

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN METEOROLOGÍA APLICADA



**“SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA DESCARGAS
ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS PARA LA CUENCA DEL RÍO
MANTARO – PERÚ”**

Presentado por:

WEIDI FLORES VILLANUEVA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
METEOROLOGIA APLICADA**

LIMA - PERU

2019

INDICE

I. INTRODUCCION.....	1
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1 TORMENTAS ELÉCTRICAS	4
2.1.1 TIPOS DE DESCARGAS DE RAYOS DE NUBE A TIERRA	7
2.1.2 CONEXIÓN DE RELÁMPAGO Y PROCESO DE FIJACIÓN.....	9
2.2 ESTRUCTURA ELÉCTRICA DE UNA TORMENTA	10
2.3 PROCESO DE ELECTRIFICACIÓN DE LAS NUBES DE TORMENTAS.....	13
2.3.1 PROCESO COLISIONAL INDUCTIVO DE SEPARACIÓN DE CARGAS.....	13
2.3.2 PROCESO TERMOELÉCTRICO	14
2.4 GEORREFERENCIACIÓN	15
2.5 MONITOREO DE TORMENTAS ELÉCTRICAS.....	16
2.6 SATÉLITES METEOROLÓGICOS GOES.....	21
2.6.1. ABI (IMAGEN DE LINEA DE BASE AVANZADA).....	22
2.7 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA	23
III. MATERIALES Y METODOS	29
3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y SOFTWARE.....	29
3.2 METODOS.....	31
3.2.1 GEORREFERENCIACIÓN DE PUNTOS DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS.....	31
3.2.2 DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO ENTRE LA BANDA DE VAPOR DE AGUA E INFRARROJO (GOES 13 Y GOES 16).....	34
3.2.3 RELACIONES EMPÍRICAS Y PROBABILIDADES DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS EN BASE A LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO.....	36
3.2.4 DIAGNÓSTICO DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS.....	41
3.2.5 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA.....	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1 GEORREFERENCIACIÓN DE PUNTOS DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS.....	48
4.2 DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO ENTRE LA BANDA DE VAPOR DE AGUA E INFRARROJO.....	49

4.2.1 TRATAMIENTO DE DATOS.....	49
4.2.2 ANÁLISIS DE VARIANZA.....	56
4.2.3 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES.....	60
4.3 RELACIONES DE PROBABILIDADES ENTRE LA OCURRENCIA DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO.....	64
4.3.1 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES.....	64
4.3.2 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES.....	69
4.3.3 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE.....	70
4.3.4 MODELO DE PREDICCIÓN.....	74
4.4 DIAGNOSTICO DE LA OCURRENCIA DE DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS SOBRE LA CUENCA DEL RIO MANTARO.....	77
4.4.1 PRONÓSTICO DE NOWCASTING.....	77
4.4.2 CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE SUPERFICIE Y ALTURA.....	81
4.5 IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA DESCARGAS ELÉCTRICAS DE ORIGEN ATMOSFÉRICO	88
4.5.1 SIMULACIONES DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA.....	88
4.5.2 COMPROBACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO EN CÁLCULO DE PROBABILIDADES DE OCURRENCIA DE RAYOS EN COMUNIDADES CAMPESINAS DE MARCAPOMACOCHA Y HUAYAO.....	92
4.5.3 EVOLUCIÓN DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO (TB9-TB14) EN ESTACIONES DE CUENCA DEL RÍO MANTARO DURANTE SIMULACIONES.....	94

V. CONCLUSIONES

VI. RECOMENDACIONES

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

VIII. ANEXOS

Lista de Cuadros

1. Emergencias nacionales por descargas eléctricas atmosféricas (2003 a 2017)
2. Descripción de las bandas espectrales del ABI
3. Localizaciones de Estaciones Meteorológicas
4. Ejemplo de datos del STARNET con localizaciones de descargas de rayos
5. “datos1” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha
6. “datos2” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha
7. “datos3” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha
8. “datos4” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha
9. “datos5” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha
10. “datos1” generados para comunidad campesina de Huayao
11. “datos2” generados para comunidad campesina de Huayao
12. “datos3” generados para comunidad campesina de Huayao
13. “datos4” generados para comunidad campesina de Huayao
14. “datos5” generados para comunidad campesina de Huayao
15. Probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas en la comunidad campesina de Marcapomacocha
16. Probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas en la comunidad campesina de Huayao

Lista de Figuras

1. Esquema de una célula tormentosa en tres estadios de su ciclo de vida a). estado cumulus, b). estado maduro y c). estado de disipación.
2. Diferentes tipos de descargas eléctricas atmosféricas
- 3.(a-d): Descargas negativas en descenso, descargas positivas en descenso, descargas positivas en ascenso y descargas negativas en ascenso, respectivamente
4. (a-f): Diferentes etapas de formación del rayo
5. Estructura eléctrica de una tormenta
6. Proceso colisional inductivo de separación de cargas
7. Proceso termoeléctrico de separación de cargas
8. Distribución espacial de los instrumentos de medición del GOES-16
9. Mapa de localización de estaciones meteorológicas que parte del estudio
10. Mapa de ubicación de los centros poblados de intervención para la implementación del Sistema de Alerta Temprana
11. Criterio de selección de sistemas nubosos que generan descargas eléctricas atmosféricas
12. Diagrama de Flujo – Activación del Sistema de Alerta Temprana por Descargas Eléctricas de Origen Atmosférico
13. Variabilidad de diferencia máxima por año en la comunidad campesina de Marcapomacocha
14. Variabilidad de diferencia máxima por mes en la comunidad campesina de Marcapomacocha
15. Variabilidad de diferencia máxima por mes y por año en la comunidad campesina de Marcapomacocha
16. Variabilidad de diferencia máxima por año en la comunidad campesina de Huayao
17. Variabilidad de diferencia máxima por mes en la comunidad campesina de Huayao
18. Variabilidad de diferencia máxima por mes y año en la comunidad campesina de Huayao
19. Histograma de todos los valores de diferencia máxima en la comunidad campesina de Marcapomacocha
20. Histograma de la diferencia máxima por mes y por año en la comunidad campesina de Marcapomacocha
21. Histograma de todos los valores de diferencia máxima en la comunidad campesina de Huayao

22. Histograma de diferencia máxima por mes y por año en la comunidad campesina de Huayao
23. Frecuencia anual para el número de descargas por nubes en la comunidad campesina de Marcapomacocha.
24. Frecuencia mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Marcapomacocha.
25. Frecuencia anual y mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Marcapomacocha.
26. Frecuencia anual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Huayao
27. Frecuencia mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Huayao
28. Frecuencia anual y mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Huayao
29. Cálculo del R-squared para la comunidad campesina de Marcapomacocha
30. Cálculo del R-squared para la comunidad campesina de Huayao
31. Imagen de Satélite del GOES 16 Banda 14 para las 19:45 UTC del 8 de marzo del 2019
32. Punto grama para verificación de Temperatura de Brillo de la banda 14 en zona de Marcapomacocha
33. Punto grama para verificación de Temperatura de Brillo de la banda 14 en zona de Huayao
34. Imagen de Satélite del GOES 16 Banda 14 para las 21:45 UTC del 9 de marzo del 2019
35. Variables meteorológicas en estación meteorológica de Marcapomacocha (08 de marzo de 2019)
36. Flujo de viento a 600 mb. durante el 8 de marzo del 2019
37. Flujo de viento a 600 mb. durante el 9 de marzo del 2019
38. Humedad específica a 600 mb. durante el 8 de marzo del 2019
39. Humedad específica a 600 mb. durante el 9 de marzo del 2019
40. Aviso meteorológico vigente durante simulaciones de implementación de SAT

Lista de Anexos

1. Evolución de la diferencia de temperatura de brillo (TB9-TB14) en estaciones de cuenca del Río Mantaro durante simulaciones
2. Scripts para extracción de Temperatura de Brillo en la Banda 3 y 4 del respectivamente del satélite GOES 13.
3. Código fuente en R utilizado para cálculo de probabilidades de descargas eléctricas atmosféricas
4. Acta de conformación de comité de Sistema de Alerta temprana por descargas eléctricas atmosférica en comunidad campesina de Marcapomacocha
5. Acta de conformación de comité de Sistema de Alerta temprana por descargas eléctricas atmosférica en comunidad campesina de Huayao
6. Talleres participativos en comunidad campesina de Marcapomacocha
7. Talleres participativos en comunidad campesina de Huayao
8. Formato de verificación de implementación de Sistema de Alerta Temprana por descargas eléctricas atmosféricas en comunidad campesina de Marcapomacocha
9. Formato de verificación de implementación de Sistema de Alerta Temprana por descargas eléctricas atmosféricas en comunidad campesina de Huayao
10. Simulaciones de SAT en comunidad campesina de Marcapomacocha (08-03-2019)
11. Simulaciones de SAT en comunidad campesina de Huayao (09-03-2019)
12. Datos de rayos de Marcapomacocha
13. Datos de rayos de Huayao

RESUMEN

En el presente estudio, teniendo como ámbito la cuenca del Rio Mantaro, en la sierra central de Perú, se calcularon y evaluaron las diferencias de temperaturas de brillo entre las bandas de vapor de agua e Infrarroja del satélite GOES 13 entre junio del 2015 a noviembre del 2017 en relación con la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas dentro de un radio de 10 km respecto a las estaciones meteorológicas seleccionadas, encontrándose relaciones para cálculo de probabilidades de ocurrencia de rayos en base a la diferencia de temperatura de brillo el cual se utilizó en las simulaciones de implementación de un Sistema de Alerta Temprana para Descargas Eléctricas Atmosféricas en las comunidades campesinas de Marcapomacocha y Huayao; la aplicación de las relaciones en los algoritmos de probabilidades permitieron hacer seguimiento a los sistemas nubosos que presentaban características definidas para la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas. Los resultados demuestran que la utilización de las bandas apropiadas en el algoritmo adecuado aportan información relevante ante posibles eventos de descargas eléctricas atmosféricas con una antelación de hasta 1 hora, siendo muy útil para activar un sistema de alerta temprana por descargas eléctricas de origen atmosférico en las comunidades de las zonas altoandinas del país con la actuación responsable de los involucrados como son los profesionales, autoridades y comunidad en general con finalidades comunes como son la de prevenir daños y salvaguardar vidas. Se obtuvieron probabilidades de hasta 30% para la ocurrencia de hasta 8 rayos en un sistema nuboso típico y en base a un rango de diferencias de temperatura de brillo desde -4 a -13 °C entre las bandas 9 y 14 del satélite meteorológico GOES 16.

Palabras Clave: Nowcasting, Sistema de Alerta Temprana, Descargas Eléctricas de Origen Atmosférico, Temperatura de Brillo

ABSTRACT

In the present study, considering the Mantaro River basin in the central highlands of Peru, the differences in brightness temperatures between the water vapor and infrared bands of the GOES 13 satellite were calculated and evaluated between June 2015 and November of 2017 in relation to the occurrence of atmospheric electric discharges within a radius of 10 km with respect to the selected meteorological stations, being found ratios for calculation of probability of occurrence of rays based on the difference of temperature of brightness that was used in the simulations of implementation of an Early Warning System for Atmospheric Electric Discharge in the rural communities of Marcapomacocha and Huayao; the application of the relations in the probabilities algorithms allowed to follow the cloud systems that had defined characteristics for the occurrence of atmospheric electric discharges. The results show that the use of the appropriate bands in the appropriate algorithm provide relevant information to possible atmospheric electric shock events up to 1 hour in advance and is very useful for activating an early warning system for atmospheric electric shocks in the communities in the high Andean areas of the country with responsible action of those involved such as professionals, authorities and community in general with common purposes such as preventing damage and saving lives. Up to 30% probability was obtained for the occurrence of up to 8 rays in a typical cloud system and based on a range of brightness temperature differences from -4 to -13 ° C between bands 9 and 14 of the GOES 16 weather satellite .

Keywords: Nowcasting, Early Warning System, Electrical Discharge of Atmospheric Origin, Brightness Temperature

I. INTRODUCCIÓN

Las Tormentas Eléctricas son condiciones atmosféricas extremas, que se producen por descargas eléctricas de gran intensidad, que pueden ocurrir entre nubes o entre nubes y la tierra. Estas descargas son conocidas como rayo, que generalmente están acompañadas de un fuerte sonido producido por la dilatación brusca del aire (trueno) y un haz de luz blanca (relámpago).

Los lugares que más favorecen a la atracción del rayo son los que se localizan en un terreno llano y aquellos que contienen elementos que son buenos conductores de la electricidad siendo estos lugares las cimas de cerros, alambradas, cercos metálicos, líneas eléctricas aéreas, subestaciones eléctricas, chozas en áreas abiertas, vertientes, bofedales, torres, ductos metálicos en sectores altos, etc.

Las Descargas Eléctricas Atmosféricas (DEAT) constituyen el mayor de los disturbios Electromagnéticos con características propias de un fenómeno climático es decir con estacionalidad del momento del año en el que pueden ocurrir con mayor probabilidad, pero con mucha variabilidad en cuanto a tipo, cantidad o intensidad que afecta el desempeño de los sistemas e instalaciones eléctricas vulnerables en todo el mundo, siendo la principal causa de interrupción de servicio de las líneas de transmisión eléctrica así como de daños en redes de distribución y equipos electrónicos sensibles. Adicionalmente al perjuicio técnico y económico, pueden provocar lesiones a los seres humanos causando en ocasiones la muerte tal como se reportan en los registros del Sistema Nacional de Información para la Prevención y Atención de Desastres (SINAD) del Instituto de Defensa Civil del Perú (Cuadro 1). Dichos argumentos han encaminado a muchos investigadores a enfocar su trabajo en el estudio de las descargas eléctricas atmosféricas, basándose en observaciones, mediciones, pruebas o en principios físicos de la descarga.

El Perú, debido a su ubicación geográfica, su conformación topográfica y sistemas atmosféricos presenta condiciones para la ocurrencia de altas densidades de descargas

eléctricas atmosféricas, estas condiciones incrementan el grado de vulnerabilidad, nivel de riesgo, accidentalidad y problemas de compatibilidad electromagnética generados por las tormentas eléctricas. Por esto es de singular importancia la búsqueda continua en torno a la caracterización de este fenómeno atmosférico extremo con fines de encontrar estrategias metodológicas para prevenir o mitigar los daños y perjuicios generados por dicho fenómeno natural sobre todas las actividades humanas.

Esta problemática se extiende hacia los diferentes sistemas de transportes, almacenamientos de hidrocarburos, minerías, transmisión de energía eléctrica, espacios deportivos, escenarios con alta concentración de seres humanos, zonas residenciales, lugares de almacenamiento de explosivos, etc.

En nuestro país no existe un Sistema de Información de Descargas Eléctricas Atmosféricas que permita hacer un verdadero seguimiento, vigilancia, estudio y pronósticos de estos fenómenos, situación que pone en grave riesgo las diversas actividades económicas del país; si bien es cierto que en la normativa se estipula, que en los sistemas de protección contra rayos, se implementen sistemas de alarmas preventivas, estos no se desarrollan en mayor parte de los casos, debido a los altos costos en su implementación así como al desconocimiento por parte de quienes están en condiciones de implementarlo.

En el presente trabajo se propone un Sistema de Alerta Temprana para Descargas Eléctricas Atmosféricas mediante la relación entre la diferencia de temperatura de brillo entre las bandas de vapor de agua e Infrarroja de los satélites meteorológicos GOES con la cantidad de descargas eléctricas atmosféricas que proporciona la red de detección de descargas atmosféricas a larga distancia del Sferics Timing and Ranging Network – STARNET en las que se tienen las localizaciones geográficas de la caída de rayos sobre la Cuenca del Río Mantaro que se ubica entre las latitudes de 10.9° a 12.3° Sur y longitudes entre 74.5° y 76.4° Oeste a una altitud promedio de 3500 m.s.n.m. sobre los andes centrales de Perú entre los años 2015 y 2017.

Cuadro 1. Emergencias nacionales por descargas eléctricas atmosféricas (2003 a 2017)

Región	Provincia	DAÑOS											
		Personales				Vivienda		C. Educativos		C. Salud		Ha. Cultivos	
		Dam	Afect	Heri	Fallec	Desst	Afect	Des	Afect.	Des	Afect.	Destr	Afect
Ancash	Carhuaz	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Apurímac	Abancay	9	14	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0
	Andahuavlas	19	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	Antabamba	9	2	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
	Avamaraes	17	28	1	6	2	5	0	0	0	0	0	0
	Chincheros	12	20	6	0	3	1	0	0	0	0	0	0
	Cotabambas	55	21	5	5	9	2	0	0	0	0	0	0
Arequipa	Graú	16	60	8	4	0	3	0	3	0	0	0	0
	Arequipa	0	8	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	Castilla	0	24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Caviloma	0	105	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0
	Condesuyos	0	24	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
Ayacucho	La Unión	5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	Huamanga	7	6	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	Lucanas	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	P. del Sara	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0
	V. Fajardo	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Cajamarca	Vilcashuaman	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Cajabamba	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Cajamarca	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Chota	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	San Miguel	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Cusco	Acomayo	0	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Calca	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Canas	97	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	Canchis	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Chumbivilcas	42	13	0	0	7	4	0	1	0	0	0	0
	Espinar	17	3	3	2	3	1	0	0	0	0	0	0
	La Convención	123	84	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
	Paruro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Paucartambo	19	0	0	0	3	0	0	7	0	0	0	0
	Quispicanchis	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Huancavelica	Castrovirrey	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Churcampa	7	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Huancavelica	54	54	0	1	2	7	0	0	0	0	0	80
	Huatará	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Huánuco	Huánuco	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Lauricocha	12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	L. Prado	15	37	1	0	2	13	0	0	0	0	126	0
	Puerto Inca	0	31	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
	Yarowilca	6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Junín	Chupaca	0	0	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Huancayo	129	0	0	0	28	0	0	2	0	0	0	0
	Ascope	175	3600	0	0	112	1200	0	4	0	1	0	0
La Libertad	Julcán	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Otuzco	0	120	0	2	0	30	0	0	0	0	0	0
	S. Carrión	0	6	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
	D.A. Carrión	13	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Pasco	Pasco	0	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Huarochirí	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lima	Yauyos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M.R. Castilla	6	0	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Loreto	Mavnas	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Manu	0	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0
M. Diós	Gral. S. Cerro	0	19	1	0	0	4	0	0	0	0	0	0
	M. Nieto	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0
Piura	Morropón	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Piura	0	7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Sechura	492	1354	0	0	15	362	0	13	0	1	0	0
	Talara	33	420	0	0	0	100	0	3	0	0	0	0
Puno	Azangaro	42	22	0	0	6	3	0	0	0	0	0	0
	Carabaya	0	3	1	5	0	1	0	0	0	0	0	0
	Chucuito	830	81	1	3	18	19	0	4	0	0	0	250
	El Collao	44	4	0	0	7	7	0	0	0	0	0	0
	Huancane	0	13	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
	Lampa	24	0	3	2	5	0	0	0	0	0	0	0
Total		4102	11859	66	65	274	2870	0	44	0	5	126	330

Fuente: SINPAD – INDECI (2019)00

La importancia de esta investigación Oradica en los resultados que se obtuvieron ya que con ellos es posible empezar a trabajar en el desarrollo de una metodología que contribuya a prevenir los efectos sobre las diversas actividades económicas del país planteando un Sistema de Alerta Temprana que contribuya con la seguridad en el transporte, actividades al aire libre, minería, transmisión eléctrica de vital importancia para todos los operadores eléctricos a nivel nacional así como a otros sectores productivos del país que apoyada con la identificación de lugares críticos y análisis de parámetros con la tecnología disponible que se utilice para prevenir los riesgos económicos de inversión se verá reflejada en la mejora y optimización de los recursos durante los eventos previstos. Es de interés nacional porque a través de esta investigación se conocerá con mayor detalle el comportamiento de los eventos severos meteorológicos como las descargas eléctricas atmosféricas y sus efectos sobre la infraestructura en general y por lo tanto contribuirá a proporcionar mayores conocimientos de los mismos y las previsiones del caso ante futuros eventos, para tal efecto se tienen los siguientes objetivos:

- Georeferenciar los puntos de descargas eléctricas atmosféricas para la cuenca del Río Mantaro.
- Cuantificar la Diferencia de Temperatura de Brillo entre las bandas de vapor de agua e infrarroja de satélites GOES sobre la cuenca del Río Mantaro.
- Establecer relaciones empíricas y de probabilidades entre las Descargas Eléctricas Atmosféricas y la Diferencia de Temperatura de Brillo del satélite GOES.
- Diagnosticar la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas sobre la cuenca del río Mantaro.
- Implementar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para descargas eléctricas atmosféricas en el ámbito de la cuenca del Río Mantaro.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 TORMENTAS ELECTRICAS

Según Pinto Jr. et al. (2007), los relámpagos son descargas eléctricas asociadas a las nubes de tormenta, con la duración media de un cuarto de segundo, recorriendo una trayectoria de 5 a 10 km en la atmósfera, y siendo capaces de producir intensas corrientes y campos electromagnéticos. Se producen cuando un campo eléctrico producido por la acumulación de cargas dentro de la nube excede la capacidad dieléctrica del aire en su base. La capacidad dieléctrica del aire a nivel del suelo es del orden de 3.000 kV / m, a la altura de la base de la nube ese valor disminuye a 1.000 kV / m y dentro de ella alcanza 300 kV / m. Estas descargas eléctricas generalmente son acompañadas por truenos, que son ondas sonoras producidas por la expansión del aire calentado en el canal recorrido por la corriente del relámpago. Cerca de 50 a 100 relámpagos se producen desde la nube hacia el suelo por segundo en el mundo, equivalente a 2 a 4 mil millones de relámpagos al año.

Las nubes de tormentas son nubes electrificadas del tipo Cumulonimbus que se presentan con truenos y relámpagos. En ellas se producen procesos de generación y separación de cargas eléctricas que dan origen a los diversos tipos de relámpagos.

Una nube de tormenta típicamente presenta un diámetro de 10 a 20 km, una extensión vertical de 10 a 20 km, pueden moverse con velocidad de 40 a 50 km/h y su tiempo de duración es en promedio de 30 a 90 minutos. Ellos se presentan como tormentas aisladas o tempestades locales, o en grupos, formando tormentas organizadas, conocidas como sistemas convectivos de mesoescala, en general, más severas con lluvias y vientos más intensos, además de eventualmente producir granizo.

Los complejos convectivos de mesoescala son sistemas casi circulares, con cientos de tormentas interconectadas, con una duración media de 10 a 12 horas y diámetros de 300 a 400 km. También pueden ocurrir agrupaciones de tempestades en escala sinóptica dando origen

a las tormentas tropicales y extratropicales o ciclones, que alcanzan dimensiones de cientos a miles de kilómetros, con vientos superiores a 300 km/h y duración de varios días.

El ciclo de vida de tormentas asociadas con la ocurrencia de descargas eléctricas está relacionado estrechamente con parámetros microfísicos (cristales de hielo) y dinámicos (flujo ascendente y descendente) de las nubes (Byers; Braham, 1949; Workman; Reynolds, 1949; Goodman et al., 1988).

Para el caso del parámetro dinámico de las nubes, Kumjian et al. (2014) indican que el flujo ascendente es el responsable de la elevación de las gotas de agua líquida superresfriadas hasta los niveles superiores de la nube, lugar donde estos hidrometeoros forman los cristales de hielo y graupel, evidenciando la importante relación del flujo ascendente en la electrificación de las nubes. Así también, trabajos como los de Lang y Rutledge (2002), Tessendorf et al. (2005) y Deierling y Petersen (2008) indican que la densidad de las descargas eléctricas está asociada con la intensidad del flujo ascendente. Estos autores indican que un flujo el ascendente más intenso favorece el incremento de las colisiones entre los hidrometeoros, el cual ocasiona un mayor intercambio de cargas y de esta forma una mayor la electrificación de la nube.

Wallace y Hobbs (2006) mencionan que las tormentas ordinarias son originadas en nubes aisladas del tipo cumulonimbus producidas por convección en una masa de aire inestable al paso de un frente o líneas de inestabilidad. Estos sistemas generalmente desarrollan lluvias y el campo de presión está completamente determinado por las corrientes ascendentes cálidas. En la figura 1 se representa el modelo del ciclo de vida de una sola célula y se muestra en términos de tres etapas: cúmulos, maduración y disipación. En la etapa de cúmulos (figura 1a), la nube consiste en una cálida y flotante pluma de aire ascendente. La velocidad de la corriente ascendente aumenta rápidamente con la altura y dentro de la nube el arrastre es considerable, debido a las grandes velocidades de la corriente ascendente, las gotas de lluvia se sobreenfrián y pueden estar muy por encima del nivel de congelación. La etapa madura (figura 1b) se caracteriza por el desarrollo de una vigorosa circulación descendente, que coincide con la región de la lluvia más fuerte. La circulación descendente es iniciada por la fuerza de arrastre descendente inducida por las gotas. El aire seco es arrastrado a la corriente descendente (en el lado derecho de la figura 1b) y el aire no saturado debajo de la base de la nube se enfrían por evaporación desde las precipitaciones caídas. En la etapa madura, las gotas de lluvia superenfriadas todavía se localizan por encima del nivel

de congelación en la corriente ascendente, mientras copos de nieve o granizo se pueden encontrar a continuación del nivel de congelación en la corriente descendente. En la etapa de disipación el tope de la nube se aproxima a la tropopausa y se distribuye horizontalmente como un yunque (figura 1c). Como la precipitación se desarrolla a lo largo de la nube, la circulación descendente gradualmente se vuelve más extensa hasta que en la etapa de disipación, ocupa prácticamente toda la nube. Privado de una fuente de aire ascendente sobresaturado, las gotitas ya no pueden crecer y, como consecuencia, la precipitación pronto cesa.

Según Akinyemi et al. (2014), la descarga electrostática se debe a la acumulación de carga estática, que se produce como resultado de la carga triboelectrostática o por inducción electrostática. La teoría de la descarga electrostática que es el flujo momentáneo de electricidad entre cuerpos cargados eléctricamente cuando están en contacto entre sí es la base para la comprensión de relámpago.

En términos simples, el rayo es el proceso de descarga electrostática espontánea momentánea de alta corriente, que a menudo se inicia en la nube y el camino generalmente se extiende a lo largo de kilómetros de longitud. En el momento del desplazamiento ascendente, pequeñas partículas de hielo en la nube se frotan entre sí configurando el proceso de polarización.

Las cargas positivas generadas en el proceso se desplazan hacia arriba en la nube mientras que las cargas negativas se desvían hacia abajo. A medida que aumenta el tamaño de la nube, hay un aumento en la diferencia de potencial eléctrico entre las partes positiva superior e inferior negativa, que inevitablemente conducen a una reacción de descarga electrostática entre las regiones.

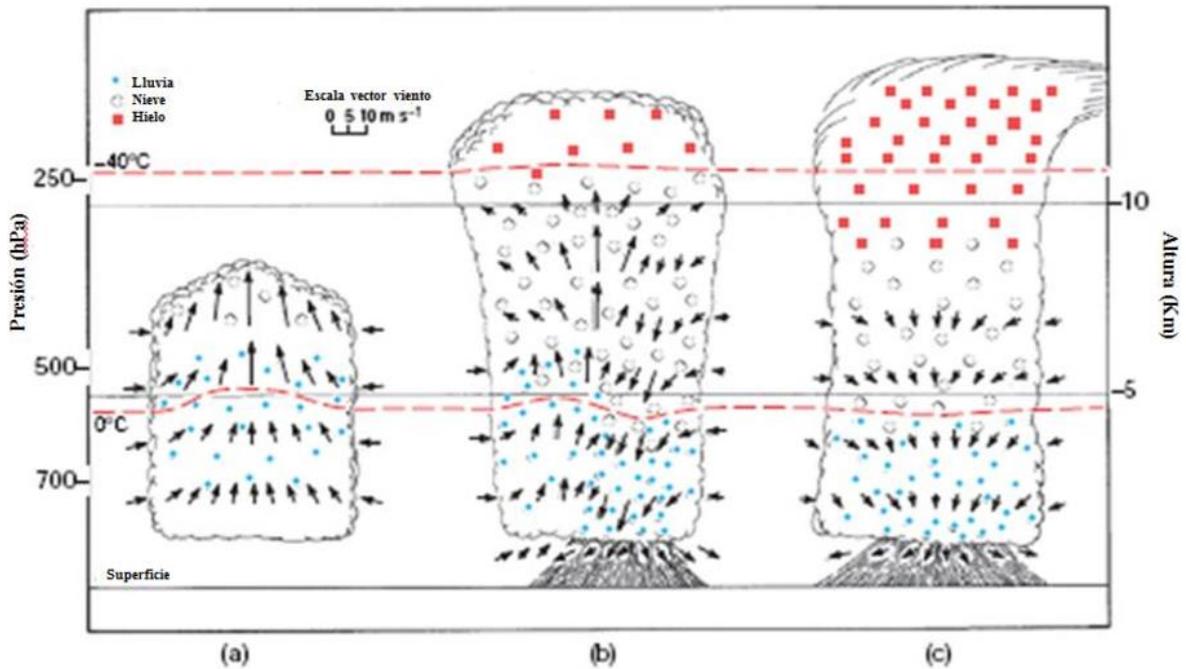


Figura 1: Esquema de una célula tormentosa en tres estadios de su ciclo de vida a). estado cumulus, b). estado maduro y c). estado de disipación.

Cuando estas descargas se limitan a la misma nube, se llama descargas dentro de la nube, mientras que aquellas que involucran dos o más nubes se llaman entre nubes o descargas de nube a nube, (figura 2). Este tipo de descargas representan aproximadamente el 75% de los rayos globales que ocurren y no involucran la superficie de la tierra. Las descargas de nube a tierra son el más relevante de todas las descargas de rayos a la vida humana y otras vidas en la superficie de la tierra (figura 2).

2.1.1 Tipos de descargas de rayos de nube a tierra

Las descargas de nube a tierra se clasifican en cuatro tipos principales:

rayos descendentes negativos

un rayo positivo hacia abajo

un rayo negativo hacia arriba y

un rayo positivo hacia arriba como se muestra en las figuras 3 (a-d).

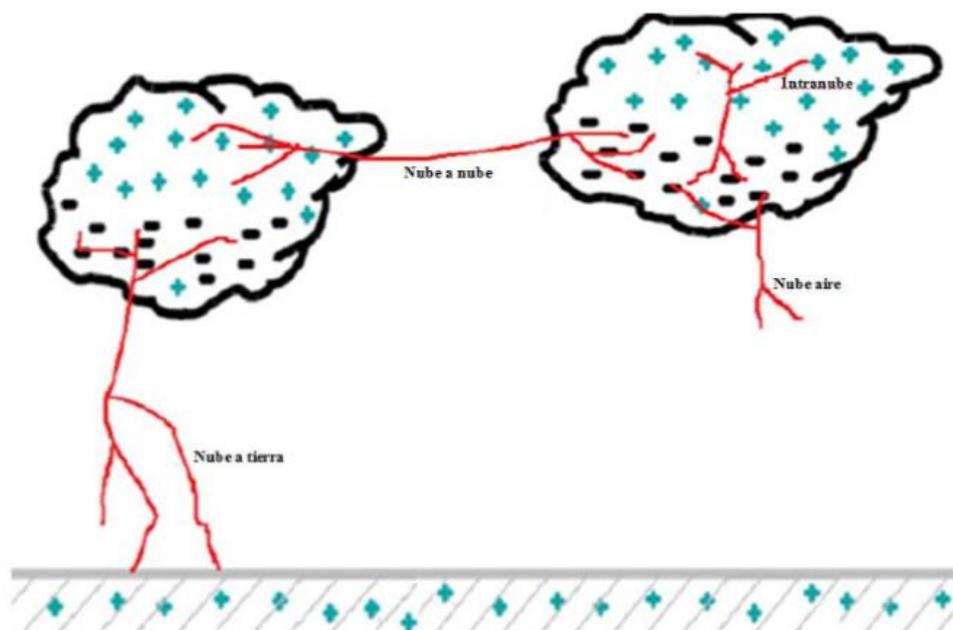


Figura 2: Diferentes tipos de descargas eléctricas atmosféricas

Fuente: Rakov (2013)

Se cree que las descargas negativas descendentes son las más comunes y representan alrededor del 90% de descargas globales nubes a tierra, mientras que menos del 10% son descargas descendentes positivas. Se observa que los tipos de descargas de rayos positiva y negativa hacia arriba se producen principalmente desde objetos altos de altura de aproximadamente de 100 m o desde objetos de altura moderada ubicados en las cimas de las montañas (Uman 1987 y Rakov 2013). Las observaciones mostraron que el proceso de iluminación se inicia desde la parte superior de dichos objetos que inducen el camino de conducción del rayo hacia la nube que mantiene cargas opuestas (Cooray y Jayaratne 1994).

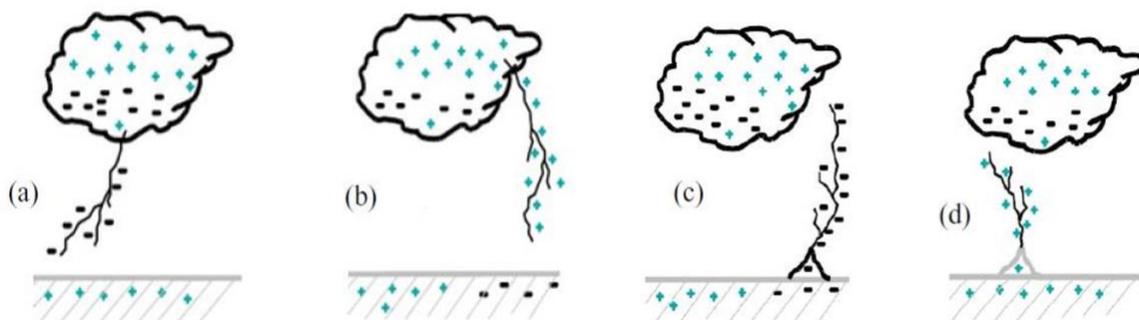


Figura 3 (a-d): Descargas negativas en descenso, descargas positivas en descenso, descargas positivas en ascenso y descargas negativas en ascenso, respectivamente Fuente: Rachidi y Rubinstein (2009).

2.1.2 Conexión de relámpago y proceso de fijación

El aire caliente migra hacia arriba a una región de congelación, creando constantes colisiones entre las partículas de hielo en la nube de tormenta impulsadas por columnas de aire que suben y bajan, lo que causa la acumulación de cargas estáticas que conducen a la descarga preliminar, un fenómeno que ocurre en la parte más baja de la nube (figuras 4a y 4b) (Uman, 1987).

A medida que las cargas estáticas aumentan lo suficiente, se rompe una pequeña carga inicial llamada líder de paso la que se desplaza por una ruta ideal de nube a nube o nube a tierra. Una vez que se establece este camino, la serie principal de los trazos siguen dicha ruta. (figuras 4 (c-e)). (Rakov, 2013)

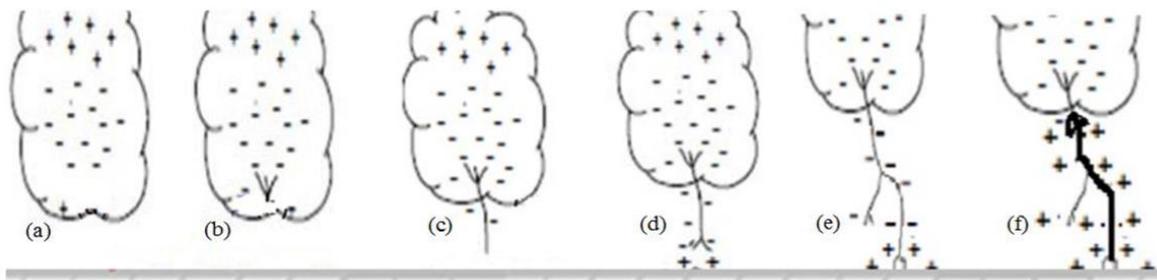


Figura 4 (a-f): Diferentes etapas de formación del rayo

Fuente: Rachidi y Rubinstein (2009)

La polaridad del líder de paso indica si el golpe tendrá características positivas o negativas. El líder de paso procede hacia abajo hacia el suelo buscando la conexión con cargas estáticas de polaridad opuesta.

Una vez que esto se logra, se crea una ruta de conducción de rayos y esto da como resultado la primera carrera de retorno como se muestra en la figura 4f.

2.2 ESTRUCTURA ELECTRICA DE UNA TORMENTA

Areitio (2010), caracteriza los rayos sobre el País Vasco, y estudia las relaciones existentes entre los rayos y la precipitación en esta misma área, para este efecto realiza una revisión teórica correspondiente a la electricidad atmosférica y la relación entre las precipitaciones

y los rayos; para la distribución y caracterización de los impactos encuentra que en invierno los rayos ocurren más hacia la costa pero en menor cantidad que en verano. Lleva a cabo los análisis sinópticos relacionados a la ocurrencia de rayos en la zona de estudio, así como su asociación a eventos locales.

Falcón y Quintero (2009) mencionan que los electrometeoros, como los rayos y los relámpagos, son manifestaciones del campo eléctrico atmosférico y de la pluviosidad. La microfísica asociada de los electrometeoros parece estar asociada también a las propiedades físicas y químicas de la atmósfera local de ocurrencia. El metano es un aerosol asociado a la microfísica atmosférica. La concentración de metano en la tropósfera superior podría favorecer la formación de núcleos polares donde el campo eléctrico se incrementa localmente en las nubes de tormentas. Se presenta un estudio microfísico de la influencia del metano como agente cocausal de los electrometeoros en la atmósfera baja. El modelo teórico elaborado muestra de que manera está vinculado el campo eléctrico local y los aerosoles piroeléctricos, como el metano, con los procesos microfísicos de la convección y el transporte de cargas en nubes de tormentas.

Según Exequiel (2008), cita a los científicos británicos, G. C. Simpson y C. T. R. Wilson, que de forma independiente y utilizando métodos distintos, fueron los primeros en descubrir la estructura de carga eléctrica en una nube de tormenta. Sin embargo, estos científicos mantuvieron, durante más de dos décadas, posiciones opuestas sobre la polaridad del momento dipolar de las nubes de tormenta. Simpson midió la carga transportada por las gotas de lluvia debajo de las nubes de tormenta. A su vez, Wilson midió el cambio en el campo electrostático debido a las descargas eléctricas. Posteriormente se identificaron una estructura electrostática tripolar en las nubes de tormenta: una región de carga positiva superior, una región de carga negativa principal a alturas medias, y una región de carga positiva más pequeña a bajas alturas.

La región de carga negativa principal se encuentra localizada entre las isotermas de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se encuentra confinada verticalmente con una extensión de aproximadamente 1 km. Su extensión horizontal es de varios kilómetros y tiene una densidad de carga entre 1 y $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^3$. La región de carga positiva superior es más difusa y puede extenderse verticalmente por varios kilómetros hasta el tope de la nube. La magnitud de la carga eléctrica que almacena es del mismo orden que la región de carga negativa principal, aunque

su densidad de carga es menor. Las regiones superior positiva y negativa principal están usualmente separadas por una zona cuasi neutral.

La región inferior de carga positiva es típicamente más pequeña y su carga es un orden de magnitud menor que las otras dos regiones, y puede extenderse por debajo de la isoterma de 0 °C.

Generalmente existe una cuarta región de carga en el contorno superior de la nube de tormenta. Esta región tiene una polaridad negativa y usualmente se explica como una capa de apantallamiento.

Keith y Saunders (1990) y Baker et al. (1995), encontraron que la actividad eléctrica de las tormentas esta relacionada con la concentración y el tamaño de los cristales de hielo, así como de la distribución de las gotas de agua líquida super-resfriadas (Saunders et al., 1991). De la misma forma, Herzegh y Jameson (1992), Homeyer y Kumjian (2015) y Snyder et al. (2015) observaron, en sistemas convectivos, la presencia de gotas de agua super-resfriadas por encima de la isoterma de 0 C. Mientras que Mattos et al. (2017) observaron este comportamiento antes y durante el inicio de la actividad eléctrica de las tempestades, sugiriendo que las gotas de agua líquida super-resfriada al congelar forman cristales de hielo y graupel cónico, los cuales son necesarios para generar la electrificación de la nube. Scavuzzo et al. (1994) analiza la estructura eléctrica de una nube de tormenta donde es posible observar una región de carga negativa entre dos regiones de carga positiva como se puede observar en la Figura 1. La región cargada negativamente se encuentra localizada aproximadamente entre las isotermas de -15 °C y -25 °C, y tiene una altura de alrededor de un kilómetro. La región positiva superior está menos localizada y su altura puede ser de varios kilómetros. Las densidades de carga de estas dos regiones son similares y en el momento de una descarga llegan a tener entre 1 y 10 Coulomb por kilómetro cúbico (c/km³). La región inferior de carga positiva es más pequeña y su carga uno a dos órdenes menor que las otras zonas.

Los campos eléctricos medidos en regiones próximas a donde se han iniciado descargas son del orden de los cientos de kilovolts por metro (KV/m).

Existen tres caminos por los cuales aproximarse a la investigación del posible mecanismo responsable de la electrificación de las tormentas:

- a. Experimentos de laboratorio y cálculos teóricos realizados para cuantificar el intercambio de carga entre partículas de hielo interactuantes, de diversos tamaños, fases y diferentes condiciones ambientales.
- b. Mediciones de campo; donde sensores remotos y mediciones in situ miden las características dinámicas, termodinámicas, microfísicas y eléctricas de la nube, que luego son elaboradas e interpretadas.
- c. Estudios de modelado numérico; que simulan el crecimiento de la nube y tomando en cuenta los procesos físicos que ocurren dentro de ella, dan información de cómo los complejos procesos podrían interactuar para producir una electrificación neta de la nube.

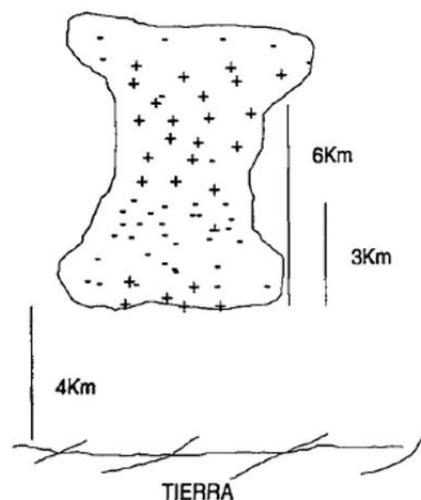


Figura 5: Estructura eléctrica de una tormenta

2.3 PROCESO DE ELECTRIFICACION DE LAS NUBES DE TORMENTAS

2.3.1 PROCESO COLISIONAL INDUCTIVO DE SEPARACION DE CARGAS

Para Johnson y Singer (1955) hay varias teorías para la separación de cargas en tormentas, y es concebible que algunos puedan explicar en algún grado el proceso de carga. Siendo una de esas teorías de separación de cargas atribuida a C.T.R Wilson que se conoce como la

cámara de nube. En la teoría de Wilson se asume que un campo eléctrico de iones coexiste con las gotas de nubes de diversos tamaños. Todas estas se asumen en una nube cumulus joven que está desarrollándose vigorosamente. Una gran caída de nubes, que cae con respecto al aire ascendente, es inicialmente eléctricamente neutral, pero está polarizado con la carga positiva concentrada en el lado de la gota que enfrenta el lado negativo del campo y la carga negativa mirando hacia el lado positivo del campo. Al caer a través del aire que contiene iones negativos y positivos, la colección de eficiencia de la gota será mayor para los iones opuestos en el signo a la concentración de carga en la superficie delantera o de barlovento de la gota que a los iones del mismo signo. La eficiencia de la colección de la superficie posterior o de sotavento de la caída es pobre para ambas clases de iones porque la gota se está alejando de los iones y debido a un patrón de flujo adverso del aire. Sin embargo, iones con signo opuesto al de la superficie posterior de la gota será ligeramente favorecido para la captura.

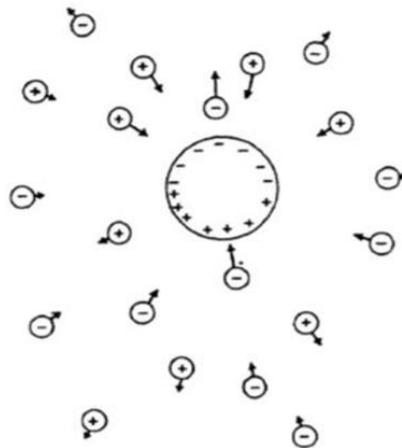


Figura 6: Proceso colisional inductivo de separación de cargas

Fuente: Johnson y Singer (1955)

La consideración de estos factores nos lleva a la conclusión de que una caída descendente inicialmente neutral debería ocurrir. La cantidad de carga ganada no puede exceder un valor determinado por el tamaño de la gota y su constante dieléctrica, pero es probable que este valor rara vez se alcance. Sería esperado de una consideración de este proceso que todas las gotas no tendrían lo mismo en cualquier nivel en la nube, pero que habría una tendencia a que las gotas más grandes se vuelvan más negativas (debido al campo normal de buen tiempo de la tierra cuando inició el proceso) y concentrado en la sección más baja de la nube. Las

gotas pequeñas tenderán a elevarse a niveles más altos en la nube y en este proceso ir recogiendo el exceso de iones positivos que dejan las gotas más grandes.

2.3.2 PROCESO TERMOELECTRICO

Pinto Jr. et al. (2007), mencionan que de los procesos no inductivos, el más reciente es el termoeléctrico, figura 7 presentado por Williams (1989). En ella señala que la polaridad de la carga transferida durante la colisión entre el granizo y el cristal de hielo, depende de la temperatura de inversión de carga, alrededor de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si la colisión ocurre a una temperatura mayor de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, el granizo transfiere carga negativa al cristal de hielo. Siendo la temperatura menor, habrá transferencia de carga positiva.

De acuerdo con Williams (1989), para que ocurra una transferencia de carga significativa durante la colisión entre el granizo y el cristal de hielo es necesario que exista alta concentración de agua líquida súper enfriada dentro de la nube.

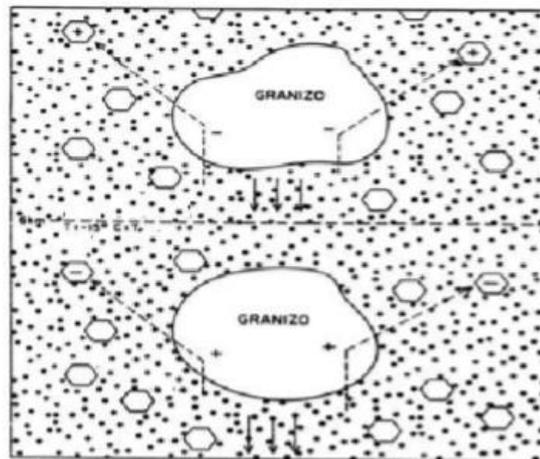


Figura 7: Proceso termoeléctrico de separación de cargas

Fuente: Williams (1989)

2.4 GEOREFERENCIACION

Para Acosta (2009) en el ámbito del Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE describe la metodología utilizada para georreferenciar la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas sobre las líneas de transmisión eléctrica en Paraguay entre los años

1998 al 2008, para este efecto define la localización de la descarga, la intensidad y cantidad como datos estadísticos denominado a este conjunto de datos como “Canales de Descargas Atmosféricas” las que se georreferencian como zonas de diferentes densidades de descargas atmosféricas sobre las líneas de transmisión perteneciente a la Administración Nacional de Electricidad (ANDE)-Paraguay, basándose en imágenes puntuales satelitales de alta resolución digital que son transmitidas desde el satélite meteorológico TRMM de la NASA, las cuales se hallan informatizadas en una base de datos a manera de GIS mediante mapas a escala mundial y localizada por un sistema de coordenadas terrestres.

2.5 MONITOREO DE TORMENTAS ELÉCTRICAS

Olarte. (2012), describe el desarrollo de un sistema piloto de monitoreo de tormentas eléctricas en las ciudades de Bogotá, Medellín y Manizales usando como medio de comunicaciones la red RENATA. Las tormentas eléctricas son registradas con redes de sensores de campo eléctrico ubicados en las tres ciudades. Cada sensor ha sido desarrollado para conectarse directamente a puntos de las redes Rumbo, Ruana y Radar Café. Los datos suministrados por todos los sensores son centralizados en un servidor ubicado en la Sede Bogotá de la Universidad Nacional conectado a la red Rumbo. Con el desarrollo de esta red de monitoreo se plantea diseñar un sistema de seguimiento de tormentas con medidas en tiempo real y con información útil para propósitos académicos y para la emisión de alertas para la protección de personas y prevención de daños producidos por descargas eléctricas atmosféricas; adicionalmente este sistema en un futuro puede ser una importante fuente de información para el estudio de fallas y daños de elementos y sistemas vulnerables como las redes de transporte de energía eléctrica, estaciones de comunicaciones, edificaciones, sistemas de control de plantas industriales y sistemas de control de tráfico aéreo, etc.

Trabajos como los de Schmetz et al. (1997) indican que el desarrollo vertical de las nubes se puede observar mediante la diferencia de los canales de vapor de agua (entre 5.7 μm y 7.1 μm) y del infrarrojo (entre 10.5 μm y 12.5 μm) cuando este valor es mayor a 0 °C.

Machado et al. (2009), relacionan las descargas eléctricas y las nubosidades del tipo convectivo que atraviesan la tropopausa combinando para este efecto las imágenes de los canales infrarrojo y vapor de agua del satélite GOES 12 y la ocurrencia de rayos nube tierra de la Red Integrada de Detección de Rayos de Brasil (RINDAT) durante el periodo enero a

febrero del 2005. La diferencia entre la temperatura de brillo de vapor de agua e Infrarrojo es un indicador de la penetración de las nubes. Con estas diferencias y las medidas de descargas en tierra fue posible encontrar una curva de ajuste exponencial que relaciona las diferencias de temperatura entre estos dos canales para encontrar la probabilidad de descargas eléctricas con un alto coeficiente de determinación.

Lima y Gomes (2009) con datos de descargas eléctricas atmosféricas detectadas por la red de sensores SIMEPAR/PR, analizan las actividades de tres sistemas convectivos, relacionándolas con el ciclo de vida de cada una de ellas. Estos sistemas ocurren al sur del continente sudamericano, cuya identificación o selección obedecen a criterios establecidos en dicho trabajo utilizando para este efecto imágenes de satélite geostacionario GOES 12, para los años de 2002 y 2003. Uno de los sistemas (el más intenso y mayor) se desenvuelve en la región donde la eficiencia de detección es inferior a 20%, y su disipación ocurre en una región con mayor eficiencia. Los otros dos sistemas ocurren dentro de la región con eficiencia de detección de red superior a 90 por ciento. Se verificó que las descargas eléctricas se concentran preferentemente en las regiones donde los núcleos convectivos presentaban temperaturas de tope de nubes inferiores a 190 °K. Los resultados sugieren que la intensidad de la convección de sistemas convectivos puede estar relacionada con la cantidad de descargas eléctricas atmosféricas asociadas a estos.

Nietzsch (2006), menciona que los modernos sistemas de localización de Descargas Eléctricas (LLS) constituyen la más avanzada herramienta para adquisición de datos de descargas eléctricas a gran escala sin embargo por si solo son poco útiles en la prevención de daños sobre las actividades de protección y operación de sistemas eléctricos de gran potencia, para este efecto, el autor desarrolla una metodología original, que explora la aplicación del Sistema de Localización de Descargas Eléctricas (LLS) en conjunto con evaluaciones basadas en datos de líneas de transmisión para definir los puntos críticos de las mismas como el desempeño frente a las descargas atmosféricas y para indicar las torres críticas de la línea. Esta metodología se basa en el riesgo de ocurrencia de rayos en las torres de las líneas de transmisión y cuyos resultados han sido satisfactorios.

Baker et al. (1995), Petersen y Rutledge (1998) mencionan que las descargas eléctricas están asociadas a la glaciación de la nube y que el incremento de la tasa de relámpagos se debe al aumento del volumen de partículas de hielo que crecen en la región de fase mixta de la nube,

así como por el aumento del flujo hacia arriba. Mattos y Machado (2011) muestran que la frecuencia de las descargas hacia suelo se incrementa con el aumento de la cantidad de hielo en la nube. En el mismo sentido, Abdoulaev et al. (2001) indican que las nubes profundas están relacionadas con las grandes tasas de descarga eléctrica de tipo nube-tierra.

Vila et al. (2008) desarrollan y validan un algoritmo para el seguimiento y pronóstico de radiación y características morfológicas de los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) a través de sus ciclos de vida completos utilizando información del canal térmico del satélite GOES. Establecen para este seguimiento: 1) un método de detección de cluster en la nube basado en una temperatura de umbral (235 °K), 2) una técnica de seguimiento basada en áreas superpuestas del SCM en imágenes sucesivas, y 3) un módulo de pronóstico basado en la evolución de cada SCM respecto de pasos anteriores. Esta característica se basa en el posible desplazamiento del MCS (considerando el centro de masa de la posición del clúster de nubes basados en pasos de tiempo anteriores) e información estadística de la evolución de su tamaño durante la estación húmeda a nivel de mesoescala.

Se aplicó la herramienta nowcasting para evaluar el desplazamiento de MCS y la evolución del tamaño en la cuenca del De la Plata en Sudamérica con intervalos de tiempo de 30 hasta 120 min. El rendimiento del pronóstico y el seguimiento de la evolución de la nube mediante la técnica de Clusters (ForTraCC) se evaluó en función de la diferencia entre los pronósticos y las imágenes observadas. Esta evaluación muestra un buen acuerdo entre el tamaño y temperatura mínima observado y previstas para tiempos de entrega más cortos, pero tiende a subestimar el tamaño de MCS (y sobrestimar la temperatura mínima) para mayores tiempos pronosticados.

Chávez (2013) calculó la temperatura de brillo a partir de las imágenes GOES en el canal infrarrojo 4 a partir de la cual se estimó la altura del tope de las nubes. Se contrastó la temperatura de brillo (GOES) con la lluvia estimada en la superficie (PR TRMM) y no se encontró una relación uno a uno. Se comparó la altura del tope de las nubes calculada de las imágenes GOES con la altura de las tormentas (PR TRMM) y se encontró casos en los cuales la altura de la nube es menor que la altura de la tormenta, esto revelaría una limitación del sensor del GOES el cual recibe la radiación infrarroja de una zona que puede estar solo parcialmente nublada, lo cual llevaría a obtener valores de temperatura de brillo que no representan la altura real de las nubes en esa zona.

Mecikalski y Bedka (2006), Mecikalski et al. (2008), Mecikalski et al. (2010) mostraron que los atributos físicos asociados con el desarrollo de nubes cúmulos, tales como la glaciación en la parte superior de la nube, la intensidad del flujo ascendente, el desarrollo vertical y el tamaño de las partículas pueden ser monitoreados mediante diferencias de canales o mediante el empleo de bandas espectrales específicas a tal fin.

Arellano y Escalante (2014), presentan una metodología para la estimación del potencial de tormentas basada en el empleo de patrones antecedentes de éstas, obtenidos al acoplar datos medidos en superficie e información interpretada de temperatura de brillo obtenidas de las imágenes de satélite, con los que se identificaron en aquellas tormentas registradas en superficie comprendidas dentro del periodo 2004-2006, lapso con imágenes satelitales disponibles. Se utilizaron las imágenes correspondientes al espectro infrarrojo (IR) en la banda 10.7 μm (canal 4), provenientes de los satélites GOES-11 y GOES12. En general, el procesamiento de las imágenes IR consistió en la transformación de los valores de píxeles de las imágenes (0 a 255) a temperaturas de brillo en $^{\circ}\text{C}$.

Mattos y Machado (2011), analizan algunas propiedades físicas y microfísicas de los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) y relámpagos de nube a tierra utilizando datos satelitales del GOES-10 infrarrojo, NOAA-18, canales de microondas del TRMM e información de detección de rayos de Brasil con una eficiencia de detección de rayos superior al 90% entre los años 2007 a 2009. Basados en un método automático de detección de SCM, se identificaron los ciclos de vida de 720 SCM. Durante el ciclo diurno, la máxima actividad eléctrica se produjo cerca del momento de la fracción de nube convectiva máxima (18 UTC) y 3 h después de la tasa máxima de expansión del área normalizada. Los ciclos diurnos de ambas propiedades fueron modulados por calentamiento diurno y, por lo tanto, podría usarse para monitorear la variabilidad diurna de la ocurrencia de un rayo.

El crecimiento del área durante la fase inicial de SCM ejerció una fuerte influencia en su tamaño y duración, y por lo tanto también mostró un potencial para definir la posibilidad de actividad eléctrica durante su ciclo de vida. El ciclo de vida promedio de los rayos mostró una maduración máxima en SCM, mientras que la densidad de rayos promedio máxima se produjo en la etapa del ciclo de vida inicial del SCM. La tasa de crecimiento de la actividad eléctrica durante las primeras etapas puede indicar la fuerza de convección y la posible duración de los sistemas con ocurrencia de rayos.

Fuertes procesos de condensación y flujo de masa durante la fase de crecimiento de los sistemas pueden proporcionar condiciones favorables para la electrificación de la nube y ocurrencia de un rayo. Una comparación de altas frecuencias de microondas con datos de rayos mostró una fuerte relación del contenido de hielo integrado verticalmente y el tamaño de las partículas con la ocurrencia de rayos, con la correlación de Pearson de 0,86 y 0,96, respectivamente. La diferencia de polarización en los 85 GHz del canal mostró que la actividad eléctrica aumenta linealmente con la reducción de polarización, asociada con un alto valor del coeficiente de correlación de Pearson (por encima de 0.90). Esto sugiere que las regiones con la actividad eléctrica más intensa se encuentran predominantemente en áreas con una alta concentración de partículas de hielo más grande orientadas verticalmente, debido a la existencia de corrientes ascendentes intensas y el campo eléctrico.

Estos resultados demuestran el uso potencial de las características termodinámicas, dinámicas y microfísicas para analizar la severidad de las tormentas eléctricas y como información adicional para la difusión inmediata y monitorear la actividad eléctrica en grandes regiones que carecen de sensores de rayos terrestres.

Cárdenas et al. (2004) con base en la regresión logística, proponen un método para el pronóstico de las tormentas eléctricas y elaboran un modelo para el aeropuerto de la ciudad de Barranquilla (Colombia). A partir del análisis de las diferentes variables meteorológicas de superficie, de altura y de los índices termodinámicos que representan los procesos físicos que intervienen en la generación de tormentas eléctricas, se detecta la interrelación existente entre ellas y la ocurrencia del fenómeno; se identificaron aquellas variables e índices que tienen la mayor participación y, utilizando estas últimas, se resumieron los procesos ceraunogénicos en una sola función matemática que permite determinar la probabilidad de que ocurra o no tormenta eléctrica en un día determinado. Dicha función fue probada para pronóstico en el aeropuerto de la ciudad de Barranquilla.

2.6 SATELITES METEOROLOGICOS GOES

La serie 16 del Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-16) es parte de una nueva generación de satélites geoestacionarios desarrollados por National Oceanic and

Atmospheric Administration (NOAA) y National Aeronautics (NASA) que tiene la misión de monitorear la atmósfera terrestre y el ambiente espacial.

Este satélite, situado a 0° de latitud, 75.2° W y 35786 km de altura (WMO / OSCAR,), lleva a bordo 6 instrumentos (Figura 8), los cuales son: el radiómetro Advanced Baseline Imager (ABI) que proporciona imágenes radiométricas de la superficie terrestre, atmósfera y nubes; el Geostationary Lightning Mapper (GLM) que realiza mediciones de descargas eléctricas; el telescopio Solar Ultraviolet Imager (SUVI) que monitorea la actividad solar; los sensores Extreme ultraviolet y X-ray Irradiance Sensores (EXIS) que miden la irradiación en el ultravioleta extremo y los rayos X; los sensores Space Environment InSitu Suite (SEISS) que monitorean los flujos de protones, electrones e iones pesados en la magnetosfera; y el magnetómetro (MAG) que monitorea el campo magnético del entorno espacial (NOAA / NASA, e).

Estos seis instrumentos proporcionan datos que presentan diversos grados de complejidad, los cuales están en función del nivel de procesamiento al que fueron presentada.

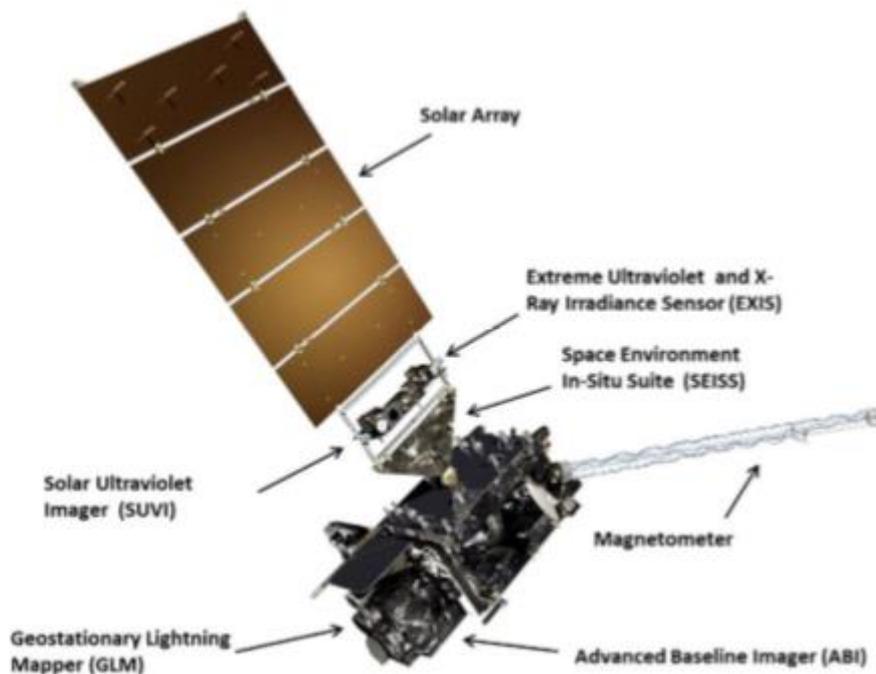


Figura 8. Distribución espacial de los instrumentos de medición del GOES-16.

Fuente: Goodman et al. (2013).

2.6.1 ABI (IMAGEN DE LÍNEA DE BASE AVANZADA)

El ABI es un radiómetro pasivo con 16 bandas espectrales en las cuales miden la radiación emitida y reflejada de los componentes presentes en la superficie terrestre y en la atmósfera. Comparado con los dispositivos que toman imágenes de los satélites GOES 13, 14 y 15, el ABI presenta significativas mejoras en la resolución de sus imágenes, con 4 veces mayor resolución espacial, 5 veces mayor resolución temporal y 3 veces mayor resolución espectral (tabla 1), con el cual se incrementa sus aplicaciones en áreas como la previsión de tiempo, oceanografía, estudios climáticos, entre otros (NOAA / NASA, a).

Cuadro 2. Descripción de las bandas espectrales del ABI

Banda	Rango de longitud de onda (um)	Longitud de onda central (um)
1	0.45 – 0.49	0.47
2	0.59 – 0.69	0.64
3	0.856 – 0.885	0.865
4	1.371 – 1.386	1.378
5	1.58 – 1.64	1.61
6	2.225 – 2.275	2.25
7	3.80 – 4.00	3.90
8	5.77 – 6.6	6.19
9	6.75 – 7.15	6.95
10	7.24 – 7.44	7.34
11	8.3 – 8.7	8.5
12	9.42 – 9.8	9.61
13	10.1 – 10.6	10.35
14	10.8 – 11.6	11.2
15	11.8 – 12.8	12.3
16	13.0 – 13.6	13.3

Fuente: Schmit et al. (2005)

2.7 SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) son herramientas que permiten proveer una información oportuna y eficaz a través de instituciones técnicas, científicas y comunitarias, por medio de herramientas y elementos, que permiten a los individuos expuestos a una amenaza latente, la toma de decisiones para evitar o reducir su riesgo y su preparación para que puedan brindar una adecuada respuesta teniendo en cuenta sus capacidades. Los SAT permiten “facultar a las personas y comunidades que enfrentan una amenaza para que actúen con suficiente tiempo y de manera adecuada para reducir la posibilidad de que se produzcan lesiones personales, pérdidas de vidas humanas y daños a los bienes y el medio ambiente”. La alerta temprana les da respaldo técnico a las comunidades o individuos para actuar con tiempo suficiente y de una manera apropiada para reducir la posibilidad de daño personal, pérdida de vidas, daños a la propiedad y al ambiente ante una amenaza o evento adverso que puede desencadenar situaciones potencialmente peligrosas. NGRD. (2016).

El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) de El Salvador ha diseñado un Sistema de Alerta Temprana por Inundaciones en base a algunas condiciones como: tipo de inundación, tipo de pronóstico, características socio-organizativas de los actores locales, experiencia y conocimientos previos de los actores locales en el manejo y gestión de sus riesgos e iniciativa de los gobiernos locales, destacando que las características e involucramiento de la población y actores locales son factores determinantes en el diseño del sistema.

En el SNET se tienen 5 etapas o estados de monitoreo que dependen de los niveles de los ríos y de la precipitación pronosticada y observada. Estas etapas condicionan los procedimientos, turnos y operaciones del Centro de Pronóstico, así como los procedimientos de comunicación con la red de observadores locales, a fin de responder de la mejor forma a la emergencia. Estas etapas son de uso interno, al pasar de una a otra por medio de umbrales, implica cambiar de procedimientos de operación. La comunicación se da directamente del Centro de Pronóstico a la comunidad en riesgo y paralelamente a los Comités de Emergencia Locales y Departamentales. A través de la conformación de la Red de observadores locales y del levantamiento de información en campo, las comunidades ubicadas en zonas susceptibles a inundación han sido clasificadas de acuerdo a la frecuencia de inundaciones. Lopez (2006).

Machado et al. (2003) desarrollan un método de previsión en el corto plazo de sistemas convectivos, utilizando imágenes de satélite meteorológicos en el canal infrarrojo, posibilitando prever con varias horas de antelación la evolución y desplazamiento de sistemas tormentosos severos sobre los sistemas eléctricos de energía de Electropaulo y Elektro. Este sistema se basa en las características morfológicas y estructurales de los sistemas convectivos iniciando con el pre-procesamiento de imágenes de satélite, definición de umbrales para caracterización de sistemas convectivos, definición del modelo de “espacios conexos” que generarán los grupos de píxeles, se incluyen variables en el nuevo modelo estadístico, utiliza un método de acompañamiento en el tiempo, cálculo de velocidad y dirección de propagación, tendencia de crecimiento y desarrollo del sistema convectivo, Luego de todos estos procedimientos plantean un prototipo del Modelo Final de Monitoreo de Sistemas convectivos.

Según Acosta (2013) los fenómenos atmosféricos han incrementado su frecuencia e intensidad durante los últimos años debido a los efectos del cambio climático. La Región Caribe Colombiana ha sido una de las zonas más afectadas debido a inundaciones súbitas y fenómenos atmosféricos, aumentando el nivel del riesgo ya que es una zona vulnerable debido a factores económicos, sociales y ambientales. El programa de investigación en gestión integral del riesgo y adaptación al cambio climático de la Corporación Universidad de la Costa ha desarrollado acciones estratégicas para la reducción del riesgo de las amenaza de inundaciones súbitas y fenómenos atmosféricos en el área Metropolitana de Barranquilla, la implementación de sistemas de monitoreo y sistemas integrales de alerta temprana, permitiendo que las autoridades y comunidad en general tomen decisiones para la prevención de desastres. Dichos proyectos están enmarcados dentro de políticas de sostenibilidad que los hace ser económicamente viable, ambientalmente responsables y socialmente justos. Proyecto desarrollado por los programas de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Civil y Sistemas que se presentó como una solución interdisciplinaria donde se proyecta diseñar y desarrollar un prototipo experimental de un Sistema de Alertas Tempranas (S.A.T) que permita entregar datos importantes en tiempo real a la ciudadanía sobre el nivel, caudal y fuerza de empuje del arroyo “La Brigada”, en la ciudad de Barranquilla.

Este proyecto está dividido en cinco fases:

a. Investigación Preliminar: Se dieron a conocer los antecedentes del proyecto y el estado actual de la problemática a resolver, así como de los medios tecnológicos utilizados para la solución de la misma.

b. Caracterización y Definición de los requerimientos del sistema: Se identificaron las delimitaciones del proyecto, población actual afectada, proyecciones futuras, cartografía, orografía, datos técnicos, tecnológicos y situación actual con respecto a las lluvias torrenciales.

c. Diseño, Construcción y Validación del Prototipo S.A.T: Se definió la diagramación de la arquitectura de red para el desarrollo del sistema, diseño de la aplicación para la captura de los datos, desarrollo del sistema de transmisión, diseño del sistema de alarmas.

Para ello se ha definido una base algorítmica de programación en priorización de peligrosidad y trazos de ruta de arroyos a través de medición de caudales.

Para las tecnologías de comunicaciones asociadas a la arquitectura de red necesaria para la implementación de la solución se revisaron tres tecnologías tales como GPS, GPRS y ZIGBEE. Teniendo en cuenta la ubicación de los puntos de monitoreo (1km de distancia para cada punto) la última es la más adecuada, ya que en la actualidad existen plataformas que trabajan con este tipo de alcance. Con base a esto, se realizó el diseño de la red que permita obtener información de los sensores en tiempo real para posteriormente ser enviados a un servidor de datos. Fueron analizadas dos plataformas tecnológicas que apoyen las terminales de monitoreo como son Arduino y Libelium, ambas ofrecen la posibilidad de comunicación inalámbrica con las tecnologías de comunicación. Teniendo en cuenta las consideraciones de los puntos de monitoreo, se llegó a la conclusión que la plataforma Arduino es adecuada para la solución de la arquitectura de red; con esta plataforma de hardware libre se pueden desarrollar proyectos con entornos interactivos e interdisciplinarios.

d. Diseño de un modelo de consumo de energía para el soporte del prototipo: Se busca el análisis, la validación y el diseño de un modelo de consumo energético aplicado al S.A.T

e. Seguimiento y Documentación.

INDECI (2018), detalla los procedimientos y técnicas para el diseño e implementación de un Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT – COM) el mismo que debe ser ejecutada por los órganos ejecutores de la Gestión de Riesgos de Desastres (GRD); como los gobiernos regionales y locales.

La Ley N° 29664 “Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres” y su Reglamento aprobado con Decreto Supremo N° 048-2011- PCM, sostiene que la Gestión de Riesgos de Desastres (GRD) se define como un proceso social cuyo fin último es la prevención, la reducción y el control permanente de los factores de riesgo de desastres en la sociedad, así como la adecuada preparación y respuesta ante situaciones de desastres. Además señala que los gobiernos regionales y locales, como integrantes del SINAGERD, formulan, aprueban normas y planes, evalúan, dirigen, organizan, supervisan, fiscalizan y ejecutan los procesos de la GRD. Asimismo, indica que los presidentes y alcaldes de los gobiernos regionales y locales son la máxima autoridad responsable de los procesos de la GRD, dentro de sus ámbitos de su competencia. En este contexto, el SAT - COM, se enmarca dentro del nivel de competencia y responsabilidad del gobierno local y regional, como parte de los procesos de preparación y respuesta. El SAT – COM, comprende: Conocimiento del riesgo, Monitoreo y seguimiento, Difusión y Comunicación de la Alerta y Capacidad de Respuesta.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. UBICACIÓN DEL AREA EN ESTUDIO, DATOS Y SOFTWARES

Las zonas de estudio corresponden a la cuenca del Río Mantaro tomando como referencia a las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y como puntos focales para la simulación de implementación del Sistema de Alerta Temprana por Descargas Eléctricas Atmosféricas a las comunidades campesinas de Marcapomacocha y Huayao correspondiente a las provincias de Yauli y Chupaca respectivamente en el departamento de Junín (figura 9 y 10; cuadro 3).

Cuadro 3. Localizaciones de Estaciones Meteorológicas

Nº	Estación Meteorológica	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)	Altitud (m.s.n.m.)
1	Carhuamayo	-10.9169	-76.0669	4130
2	Huasahuasi	-11.2616	-75.6208	2750
3	Tarma	-11.3969	-75.6903	3000
4	Santa Ana	-12.0042	-75.2208	3295
5	Viques	-12.1631	-75.2353	3186
6	Jauja	-11.7866	-75.4869	3186
7	Huayao	-12.0383	-75.3381	3350
8	Yantac	-11.3336	-76.4003	4684
9	Marcapomacocha	-11.4047	-76.3253	4479
10	Yauli	-11.6669	-76.0836	4100
11	La Oroya	-11.5169	-75.9003	4040
12	Carhuacayán	-11.2003	-76.2836	4150

Fuente: SENAMHI

El estudio incluyó inicialmente la utilización de información de temperatura de brillo de la banda de vapor de agua (banda 3) e Infrarroja (banda 4) del satélite GOES 13 entre junio del 2015 a noviembre del 2017, para elaboración de algoritmos de cálculos de probabilidades, posteriormente al entrar en operaciones el satélite GOES 16, se utilizó información de sus bandas equivalente de vapor de agua (banda 9) e infrarrojo (banda 14) para las simulaciones de implementación del SAT así también se utilizó las localizaciones geográfica (Latitud y longitud) de descargas eléctricas atmosféricas acontecidas en las inmediaciones de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

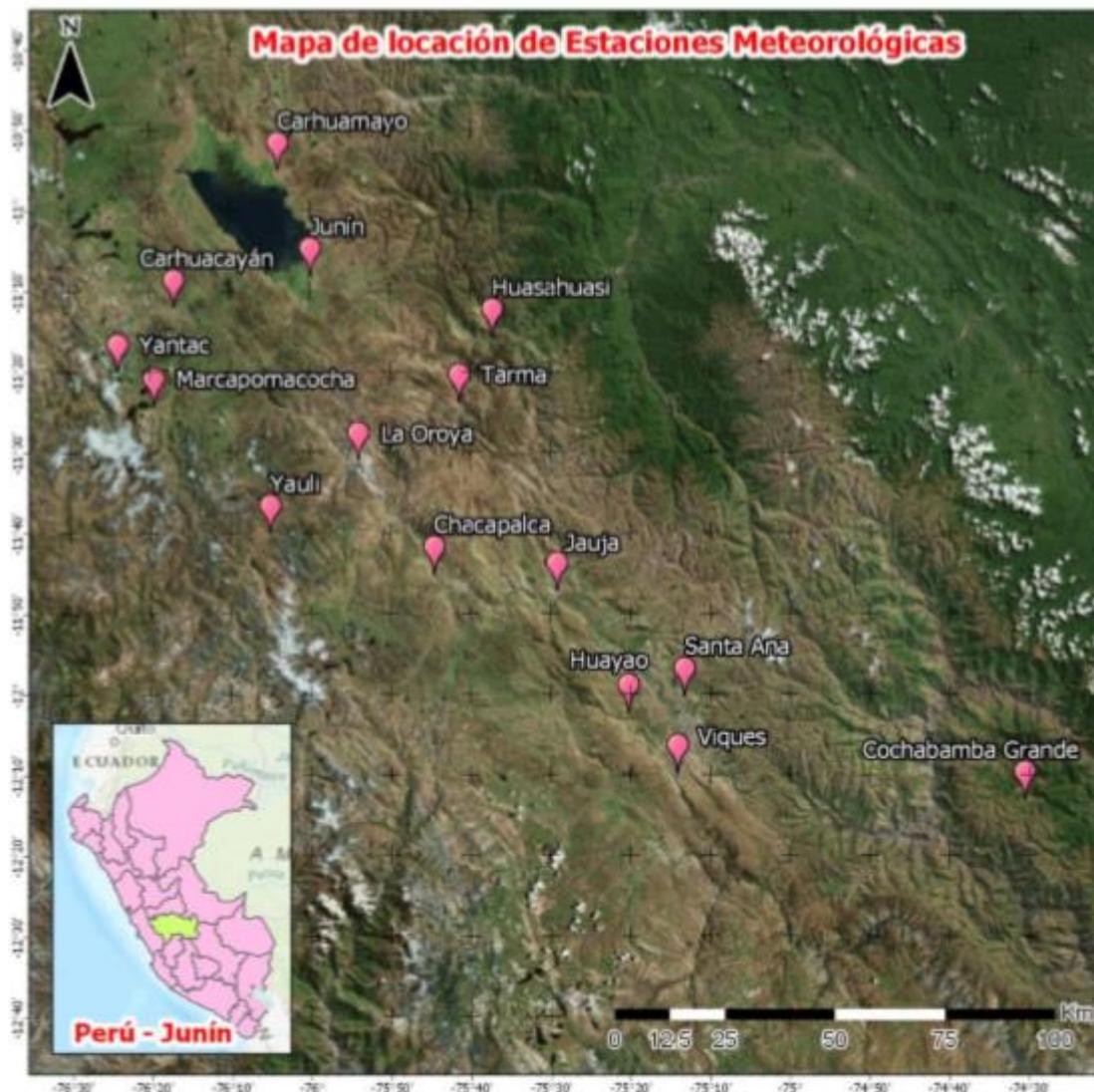


Figura 9. Mapa de localización de estaciones meteorológicas que forman parte del estudio

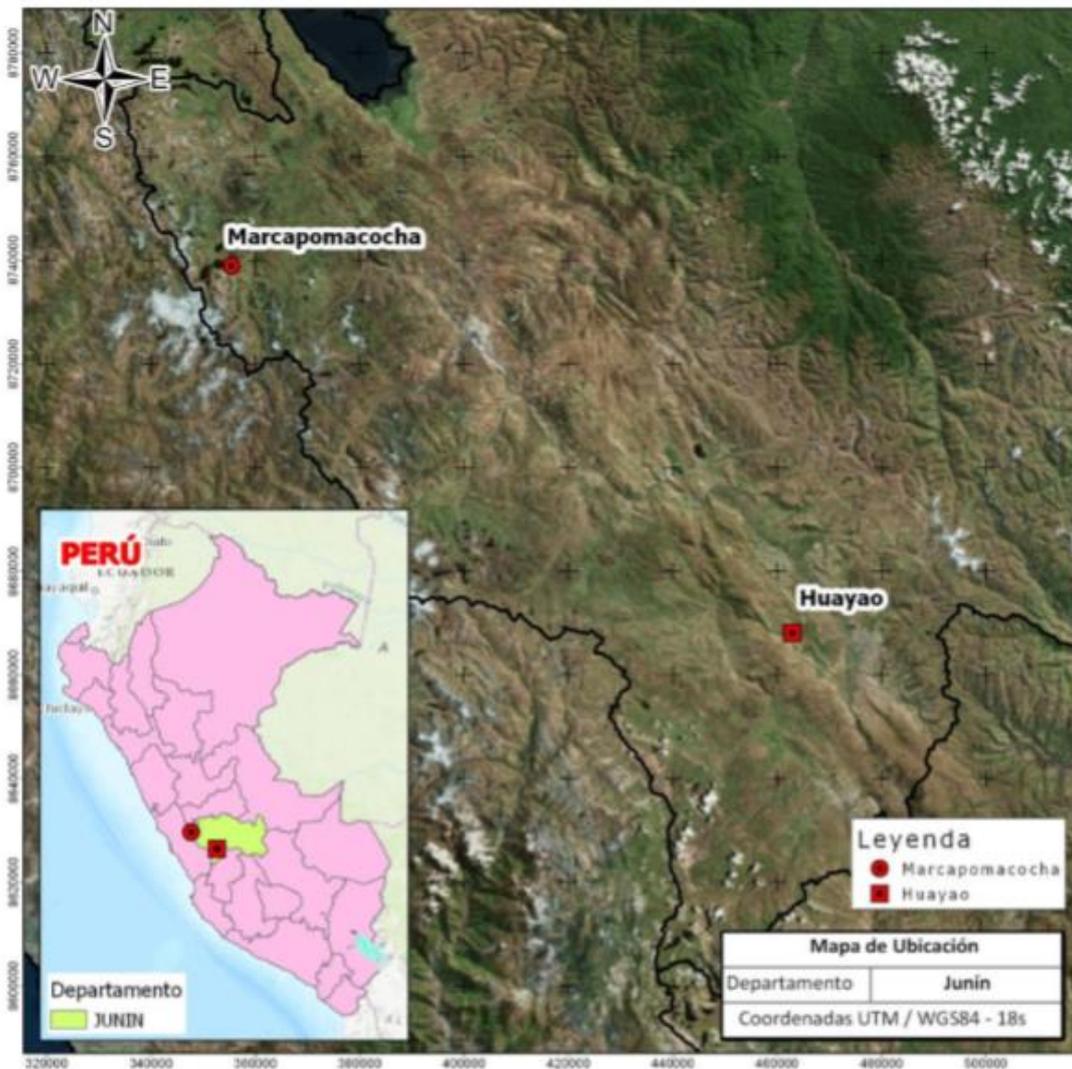


Figura 10. Mapa de ubicación de los centros poblados de intervención para la implementación del Sistema de Alerta temprana

3.2 METODOS

3.2.1 GEOREFERENCIACION DE PUNTOS DE DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFÉRICAS

Se seleccionaron los eventos de descargas eléctricas atmosféricas acontecidos entre junio del año 2015 y noviembre del 2017 del portal web del Sferics Timing and Ranging Network (STARNET) (<http://www.zeus.iag.usp.br/ftp/>) accediéndose a la información de localización de descargas eléctricas atmosféricas (latitud y longitud) a nivel de la cuenca del

Rio Mantaro, considerándose aquellos eventos acontecidos hasta los 10 km alrededor de las estaciones meteorológicas en las zonas de interés y aproximándose al momento de obtención de imágenes de satélite tanto en los canales de vapor de agua (banda 3) e Infrarrojo (banda 4) sobre las estaciones meteorológicas seleccionadas dentro de la cuenca de interés.

Al tener la localización geográfica de una estación meteorológica y a la vez los puntos de descargas eléctricas acontecidas sobre la cuenca del Rio Mantaro (Latitud y longitud) se adoptó una distancia máxima de 10 km alrededor del centro de una circunferencia imaginaria cuyo centro precisamente es la estación meteorológica respectiva, que está muy próxima al centro poblado de interés (1.5 km de comunidad campesina de Huayao y 1.0 km de comunidad campesina de Marcapomacocha), con esta pudieron seleccionarse aquellas descargas que ocurrieron en el mismo periodo de análisis que están dentro de una circunferencia imaginaria; considerando que como parte de la caracterización espacial de las tormentas se determinó la extensión horizontal de ellas encontrándose que la mayoría de las tormentas tienen una extensión entre 25 km² y 100 km² (Chavez, 2013).

Se extrajeron las latitudes y longitudes de cada descarga eléctrica atmosférica acontecida en un periodo determinado y que está dentro de los límites de la circunferencia de 10 km de radio (Figura 11).

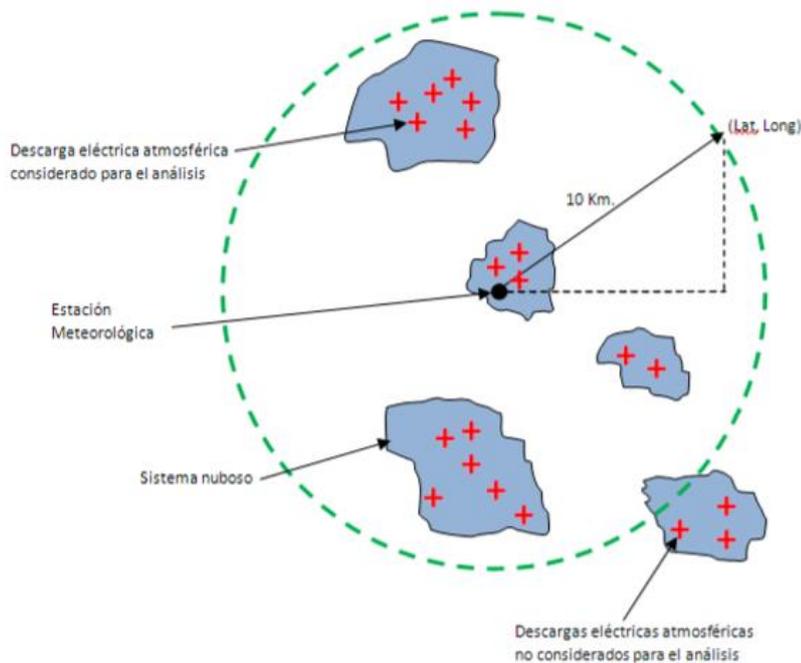


Figura 11. Criterio de selección de sistemas nubosos que generan descargas eléctricas atmosféricas

La circunferencia discontinua de color verde, limita el área dentro del cual se consideran aquellos sistemas nubosos con posibilidades de generar descargas eléctricas atmosféricas que serán estudiados.

3.2.2 DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO ENTRE LA BANDA DE VAPOR DE AGUA E INFRARROJO (GOES 13 Y GOES 16)

Inicialmente se utilizaron los archivos en formato NetCDF de las imágenes de satélite GOES 13 para la banda 3 (Vapor de Agua) y banda 4 (Infrarroja) y de estos se seleccionaron aquellos que coinciden con la localización de descargas eléctricas atmosféricas (en el tiempo y el espacio) de los reportes del portal STARNET con el fin de asociar la ocurrencia y las localizaciones de las mismas con los sistemas nubosos que originaron las descargas eléctricas atmosféricas tales como las nubosidades del tipo cumulonimbos o los llamados complejos convectivos de mesoescala; las diferencias positivas entre la temperatura de brillo del vapor de agua y la infrarroja son solo posibles cuando las nubes de convección profunda penetran la estratósfera (Schmetz et al. 1997).

La ventana infrarroja está localizada en la región del espectro electromagnético cuando la atmósfera absorbe ligeramente la radiación terrestre. Sin embargo, el canal de vapor de agua tiene una característica de fuerte absorción y la temperatura de brillo (TB3) reportado por este canal es casi siempre más frío que las medidas del Infrarrojo (TB4). Por lo tanto la diferencia entre la temperatura de brillo del vapor de agua y el infrarrojo es normalmente negativa ($TB3 - TB4 < 0$), excepto si la penetración de las nubes va a través de la tropopausa, humedeciendo la estratósfera y luego, las temperaturas que incrementan a este nivel hacen que las diferencias se vuelvan positivas.

En estos casos estas diferencias positivas están relacionadas a un disparo asociado generalmente a una gran profunda convección de tope de nube con una alta cantidad de hielo que es la principal responsable del desarrollo de un campo eléctrico en el interior de la nube.

Las descargas atmosféricas son las responsables de la acumulación de cargas dentro de las nubes que puede ocasionar la ruptura dieléctrica del aire (Pinto Jr. et al. 2007). El centro de las cargas (positivas y negativas) está formado por varios procesos de escala microscópica

que transfieren cargas positivas y negativas durante la formación de gotas de nubes, gotas de lluvias y partículas de hielo (Mac Gorman and Rust 1998). Mediante los estudios de observación se revela que las descargas eléctricas están asociadas con presencia de grandes partículas de hielo y fuertes corrientes ascendentes en la región de mezcla (0 °C y 20 °C). (Baker et al. 1995; Petersen and Rutledge 1998). Por lo tanto las nubosidades de convección profunda y muy extendidas son responsables de las altas tasas de descargas eléctricas (Abdouliev et al. 2001).

La información de temperaturas de brillo de la banda de vapor de agua e Infrarroja fue obtenida de los archivos NetCDF generados por el satélite meteorológico GOES 13 a través del visualizador GRADS mediante scripts elaborados previamente; la información es extraída de acuerdo a la localización de descargas eléctricas atmosféricas proporcionadas por el STARNET (Anexo 1).

Se tomaron los valores extraídos tanto de la banda 3 y banda 4 y se obtuvieron las diferencias de temperatura de brillo (TB3 – TB4), estas diferencias de temperatura de brillo se calcularon para los eventos donde hayan ocurrido descargas eléctricas atmosféricas entre el periodo establecido para cada evento en las diversas zonas de la cuenca en estudio. Para cada imagen pixelada de diferencias del satélite GOES 13, se encontraron las ocurrencias de descargas eléctricas atmosféricas de la base de datos del STARNET con 20 minutos antes o después del momento reportado y en un radio máximo de 10 km alrededor de la estación meteorológica en consideración y la posición aproximada señalada de descarga eléctrica atmosférica.

Se formaron agrupaciones de diferencia de temperatura de brillo teniendo en consideración los siguientes criterios de asociación y cumplimiento simultaneo:

- a. Los valores de diferencia de temperatura de brillo pertenecerán a un mismo agrupamiento cuando la distancia de separación alrededor de la estación meteorológica sea menores a 10 km.
- b. Los valores de diferencia de temperatura de brillo pertenecerán a un mismo agrupamiento cuando las descargas ocurren consecutivamente en un lapso de tiempo menor a 20 minutos.
- c. Los valores de diferencia de temperatura de brillo pertenecerán a un mismo agrupamiento cuando el valor absoluto de estas diferencias sea menor a 3.2 °C.

El valor de 3.2 °C se obtuvo con el tratamiento estadístico de la totalidad de datos para obtener los intervalos de clase de cada categoría y que formaron parte de un sistema nuboso con potencial de generar descargas eléctricas atmosféricas.

Posteriormente con los archivos en formato NetCDF de las bandas 9 y 14 del GOES 16, se procedió de la misma manera, pero como veremos más adelante, esta información se utilizó para realizar las simulaciones y probar el funcionamiento de los algoritmos de cálculos de probabilidades previamente elaborados.

3.2.3 RELACIONES EMPIRICAS Y PROBABILIDADES DE DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS EN BASE A DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO

Antes de buscar las relaciones empíricas y crear el algoritmo que calcule las probabilidades de ocurrencia de rayos, inicialmente se hizo un análisis exploratorio de datos (AED) a los archivos en formato de hoja de cálculo obtenidos de la base de datos de descargas eléctricas atmosféricas del STARNET y archivos NetCDF de imágenes de satélite GOES 13 en sus bandas 3 y 4; en estos archivos generados se tiene información del año, mes, día, hora, minuto, latitud y longitud de la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas además de la temperatura de brillo de la banda 3, banda 4 así como su diferencia respectiva en base a los datos de los archivos NetCDF; se eliminaron aquellas filas y columnas con datos faltantes, atípicos u outliers.

a. Ajuste del modelo de regresión lineal

Se descompuso la variable TB3 – TB4 en su mínimo promedio, máximo promedio, media promedio y mediana promedio por hora, día y mes, como variables predictoras.

Se utilizó un modelo de regresión lineal al momento de predecir los valores de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas a partir de los valores de diferencia de temperatura de brillo entre la banda 3 y banda 4 del GOES 13 (modelo de regresión lineal múltiple).

Cuando hay más de una variable explicativa (modelo de regresión lineal múltiple), se utiliza un subíndice para cada una de ellas, por ejemplo, para el caso de tres variables explicativas se tiene:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1.X_1 + \beta_2.X_2 + \beta_3.X_3 \quad (1)$$

Los cuatro parámetros de la ecuación de regresión lineal, β_0 es conocida como la constante mientras que β_1 , β_2 y β_3 son las pendientes del modelo, en conjunto reciben el nombre de coeficientes de la ecuación de regresión.

Una vez que sean conocidos los valores de β_0 , β_1 , β_2 y β_3 del modelo de regresión lineal, éste puede ser utilizado como modelo predictivo, esto es, para realizar predicciones de los valores que tomará la variable de respuesta para determinados valores de las variables explicativas. Basta para ello con sustituir en la ecuación de regresión los valores concretos de X que se quiera (X_1 , X_2 , X_3). Al hacerlo, se obtuvieron valores predichos para Y según la ecuación de regresión para aquellos casos que en la variable X tomen valores los X_i .

En estos casos, cuando se utilizó la recta de regresión para predecir el valor en Y a partir del valor en X de un determinado sujeto (X_i), fue probable que se hayan cometido errores en la predicción realizada. A este error se le denominó como error de predicción o residual (E_i) y se definió, como la diferencia entre el verdadero valor de un sujeto en la variable Y (Y_i) y su valor predicho según la ecuación de regresión (\hat{Y}_i):

$$E_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (2)$$

La identificación o ajuste de un modelo de regresión supuso obtener los coeficientes que caracterizan al mismo, en el caso del modelo de regresión lineal, estos fueron β_0 , β_1 , β_2 y β_3 . Ello supuso también, aplicar un procedimiento de cálculo (método de estimación) que permita, a partir de los datos disponibles, obtener los coeficientes de la ecuación de la línea recta que represente óptimamente la distribución conjunta de las variables modeladas.

Un criterio natural de bondad de ajuste fue considerar la ecuación de regresión que dé lugar a un menor error en las predicciones, así, se tuvo un mejor ajuste con la ecuación de regresión cuyo error haya estado más próximo a 0.

$$\text{Mejor modelo de regresión} \rightarrow \min(SCE) = \min\left(\sum E_i^2\right) = \min\left(\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2\right) \quad (3)$$

b. Bondad de Ajuste del modelo de regresión

La bondad de ajuste del modelo de regresión encontrado se refiere al grado en que éste es conveniente como modelo que representa a las variables implicadas en el mismo. Al ajustar un modelo de regresión lineal a la distribución conjunta de sus variables obtuvimos la mejor recta de regresión de entre todas las posibles que se pueden ajustar a esa distribución, ello no significa que sea buena como modelo que represente a las variables.

Existen diferentes aproximaciones en la evaluación de la bondad del ajuste de un modelo a la realidad que ese modelo pretende representar, asumiéndose aquella que consistió en comparar las puntuaciones predichas por el modelo de regresión (\hat{Y}_i) con las puntuaciones reales a partir de las que ha sido estimado (Y_i). El índice utilizado en esta aproximación fue la suma de cuadrados de los errores de predicción o residuales (SCE):

$$SCE \text{ (o } SC_{Y.X}) = \sum_{i=1}^n E_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (4)$$

La suma de cuadrados de los residuales puede oscilar entre 0 y cualquier valor positivo. Cuando este sumatorio se aproximaba a 0, el modelo de regresión se ajustaba a los datos reales; cuanto mayor sea su valor, ello significará que más erróneas son las predicciones de la ecuación de regresión y, por lo tanto, peor su bondad como modelo predictivo.

Se ajustó el modelo de regresión lineal con los datos a disposición para predecir el número de descargas promedio por caso (nube) y por hora; para la comunidad campesina de Marcapomacocha se utilizó la totalidad de los datos recopilados (localización de descargas y diferencia de temperatura de brillo) mientras que para la comunidad campesina de Huayao solo se trabajó con los datos del año 2016 por ser el año en la que se tienen registros más completos en relación a los otros años considerados para el estudio.

c. Relaciones de probabilidades

Para establecer las relaciones de probabilidad entre la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas y las diferencias de temperatura de brillo, se realizó un algoritmo que considera los tres criterios antes mencionados (sección 3.2.2).

En este proceso, los datos se ordenaron en función al tiempo de ocurrencia de descargas eléctricas de forma ascendente y se procedió a generar cuatro nuevos archivos. El primero es útil para observar al detalle, la ubicación y la cantidad de descargas eléctricas pertenecientes a un solo sistema convectivo y sus características referidas a la temperatura de brillo de las bandas 3 y 4 además de la diferencia de temperatura de brillo entre estas bandas. El segundo es útil para tener un conteo más claro de las descargas eléctricas y su relación con los sistemas convectivos mediante el mínimo, máximo y valor promedio de diferencia de temperatura de brillo entre la banda 3 y banda 4.

En el tercero se encuentra los arreglos del número de descargas por hora, además de su valor mínimo, máximo y su promedio. De manera análoga sucede con el cuarto y quinto archivo, la única diferencia está en que estas consideran dichas características por día y por mes, respectivamente. Además de ello, se hicieron los análisis preliminares de varianza a través de gráficos boxplot para observar la variabilidad anual y mensual. A través de histogramas se analizó gráficamente la distribución de los máximos valores de diferencia de temperatura de brillo entre la banda 3 y banda 4, con el fin de observar si esta se ajusta a alguna distribución.

En cuanto al análisis inferencial, se plantearon pruebas de hipótesis con un nivel de significancia de 0.05, para verificar la dependencia entre el número de descargas y el tiempo (hora, día, mes, año) a manera de asociarlo con la cantidad de descargas por sistema convectivo. Como en otras pruebas de hipótesis, en éstas se comparan los resultados muestrales con los esperados si la hipótesis nula es verdadera. La conclusión de la prueba de hipótesis se basa en qué tan “cerca” se encuentran los resultados muestrales de los resultados esperados (Anderson et al. 2008).

En base a todo lo mencionado anteriormente, finalmente se procede a calcular la probabilidad de ocurrencia del número de descargas de una nube, mediante la creación de

un algoritmo que toma por criterios la frecuencia usual de descargas por mes y el valor de la diferencia de temperatura de brillo de la banda 3 con la banda 4
 Probabilidad considerando el mes y diferencia (TB3 – TB4)

$$P\left(\frac{Y_{ijk}}{(X_j \cap Z_k)}\right) = \frac{P(Y_{ijk} \cap X_j \cap Z_k)}{P(X_j \cap Z_k)} \quad (5)$$

Dónde:

Y_{jk}: Numero de descargas de una nube, en el j_{esimo} intervalo de diferencia y en el k_{esimo} mes.

X_j: j_{esimo} intervalo de la diferencia entre el IR3 y el IR4 (en °C). j = 1,2,3, ...

Z_k: k_{esimo} mes. k = 1,2,3, ...,12.

d. Comprobación del algoritmo de cálculo de probabilidades

Para este fin, separamos aleatoriamente del archivo datos2 en dos conjuntos, el 70% que sirva para entrenar el modelo de cálculo de probabilidades (llamada “train”) y el otro 30% para hallar su tasa de aciertos (llamada “test”) y utilizando el lenguaje de programación estadístico R, se estima las probabilidades de ocurrencia de rayos con los datos “train”.

El modelo multinomial utilizado, calculó las probabilidades de pertenecer a cierta categoría, siendo estas categorías para los números de descargas, es decir desde 1,2,3,4,5,6,7,8,9 y 10 descargas para un área encerrada en un radio de 10 km y para un periodo de una hora. La probabilidad de que el número de descargas sea igual a 1 se calcula por complemento, es decir al tener calculado todas las probabilidades de ocurrencia de descargas desde 2 hasta 10 rayos, restamos la sumatoria de las anteriores al valor de 1. Los predictores o variables explicativas que determinan estas probabilidades son diferencia de temperatura de brillo máxima (DIF_MAX), diferencia temperatura de brillo mínima (DIF_MIN) y diferencia temperatura de brillo promedio (DIF_AVG), dichas diferencias se obtuvieron al extraer los valores de temperatura de brillo de las bandas 3 y 4 de los archivos NetCDF de las imágenes de satélite GOES 13. Las variables predictoras se determinaron cuando se analizaron las correlaciones lineales que tiene el número de descargas con dichas variables.

La relación con la que se calcula las probabilidades de ocurrencia de rayos tiene la forma siguiente:

$$\text{Probabilidad}(N_{\text{descargas}} = y) = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DIF_MAX} + \beta_2 \cdot \text{DIF_MIN} + \beta_3 \cdot \text{DIF_PROM}} \quad (6)$$

Dónde:

Y : Es el número de descargas o rayos previsto

β_0 : Intercepto

β_1 : Coeficiente de la variable diferencia de temperatura máxima

β_2 : Coeficiente de la variable diferencia de temperatura mínima

β_3 : Coeficiente de la variable diferencia de temperatura promedio

3.2.4 DIAGNÓSTICO DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

El meteorólogo especialista del Servicio Meteorológico, identifica la ubicación de las localidades que pueden ser afectadas por tormentas eléctricas y realiza el monitoreo continuo de las formaciones nubosas con potencial para ocurrencia de descargas eléctricas de origen atmosférico y que están desplazándose hacia las localidades identificadas; para este efecto hace uso de las herramientas tecnológicas a su alcance (puntogramas, fortracc, intersat, imágenes de satélite, etc.) con los cuales va determinando la evolución de las temperatura de brillo para las bandas de vapor de agua e infrarrojo y con ello verificando si sus diferencias van incrementando o disminuyendo y si va tomando valores de acuerdo a los intervalos ya definidos en los que existe una moderada o alta probabilidad de ocurrencia de descargas eléctricas de origen atmosférico; la secuencia de cómo llevar a cabo este diagnóstico se presenta mediante un diagrama de flujo (fig. 12).

Asimismo, mediante las salidas de los modelos numéricos se van evaluando las condiciones meteorológicas en las diferentes capas de la atmósfera y que están relacionadas con las formaciones y desarrollo de eventos convectivos que darán origen a las descargas eléctricas atmosféricas (flujos de viento, humedad, temperatura, etc) para los periodos de análisis, los mismos que servirán al especialista meteorólogo para proporcionar un óptimo diagnóstico. Posterior al establecimiento de las relaciones de probabilidades, se probaron los algoritmos desarrollados para las comunidades campesinas de Marcapomacocha y Huayao con fines de realizar las comparaciones a la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas sobre dichas

localidades seleccionadas como “pilotos” y en las que el meteorólogo de turno ha estado evaluando mediante los pronósticos de corto plazo (nowcasting).

Los algoritmos obtenidos fueron utilizados como herramientas para activación del Sistema de Alerta Temprana mediante simulaciones que luego fue aplicado en cada una de las localidades, las mismas que se llevaron a cabo previas coordinaciones.

3.2.5 IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Para la implementación de un Sistema de Alerta Temprana para ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas se procedió de la siguiente manera:

- Se seleccionaron a las comunidades campesinas de Marcapomacocha y Huayao en los cuales se aplicaron como “pilotos” para realizar la simulación de implementación de Sistema de Alerta Temprana.
- Previamente se realizaron coordinaciones con los representantes o autoridades locales para la realización de talleres participativos de la población y sus autoridades mediante los cuales se proporcionaron los alcances necesarios para la implementación del SAT.
- Se establecieron canales de comunicación fluida entre el equipo implementador y las comunidades, estas se realizaron continuamente mediante visitas a las comunidades, vía telefónica, redes sociales, etc.
- Se mantuvo contacto permanente con las comunidades en las que se implementaron el SAT. De este modo se generó confianza y se facilitó la participación de la comunidad en las acciones de implementación.
- Se involucró a la comunidad en el proceso lo cual, garantizó el buen funcionamiento del SAT y posibilitó una aproximación más precisa a las particularidades de cada comunidad.
- Se indagaron las condiciones de infraestructura y de personal de las instituciones relacionadas con la vigilancia y/o reducción de riesgos por desastres con la finalidad de evaluar la capacidad técnica instalada y que pueda contribuir con la implementación de Sistema de Alerta Temprana, estas instituciones entre otras fueron:

✓ El observatorio meteorológico local – SENAMHI

- ✓ Comunidad campesina del pueblo de Huayao
- ✓ Agencia Municipal
- ✓ Comité de riego
- ✓ Comité de agua potable

Aprovechando los talleres participativos, se conformaron los comités de vigilancia que forman parte del Sistema de Alerta Temprana, los mismos que están constituidos por pobladores y autoridades de la comunidad en estudio, se oficializaron con los siguientes roles:

- ✓ Observador meteorólogo de la comunidad se encarga de recibir la primera información desde el servicio meteorológico, verifica in situ las condiciones atmosféricas que dan origen a descargas y comunica a presidente de SAT.
- ✓ Presidente del comité del SAT evalúa situación con miembros y ordena activación del SAT.
- ✓ Miembros del comité del SAT evalúan la situación y deciden activación
- ✓ Brigadistas, activan dispositivos sonoros/visuales del SAT, apoyan respuesta y reporte de daños.

Mediante la articulación de estos actores y participación de la comunidad en general a través de los talleres participativos fue posible compartir experiencias, conocimientos, propuestas, etc. para lograr ideas en común y que permitieron construir agendas comunes para superar los desafíos e incidir positivamente en el logro de objetivos para el bien de la comunidad. Con todo esto se plantearon la realización de simulaciones de implementación de SAT.

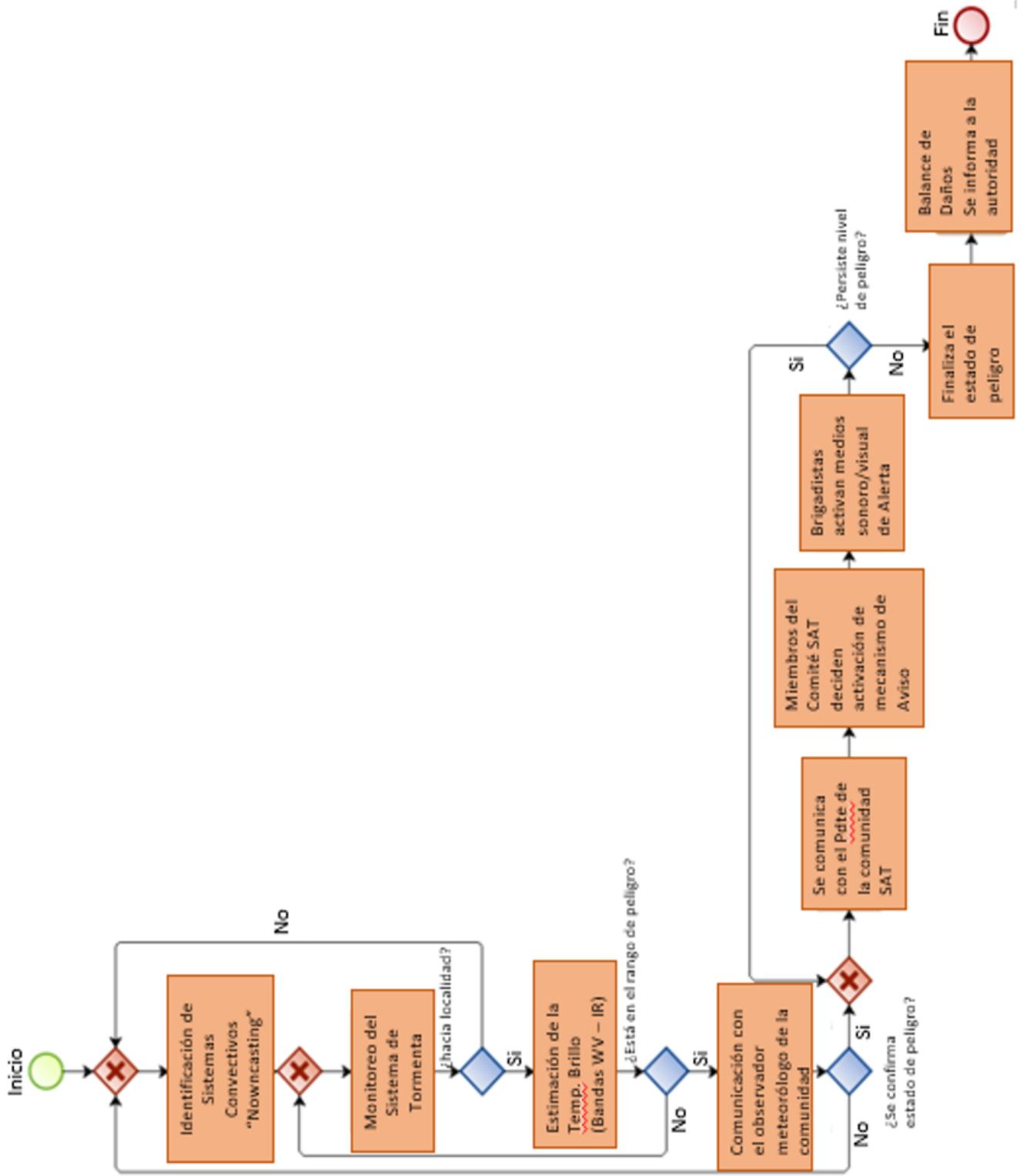
Se intentó en lo posible incluir a niños y jóvenes ya que esto dinamizó el proceso y coadyuvaría a su sostenibilidad y replicación. Asimismo, se priorizó la participación de mujeres, por su liderazgo y compromiso en procesos que contribuyen al mejoramiento de la calidad de vida.

Se respetaron los saberes, creencias y costumbres de la población, esto es fundamental ya que de este modo fue posible desarrollar un plan de trabajo que no interfiera con las actividades culturales de las comunidades como por ejemplo en la programación de los talleres participativos durante las festividades o fiestas costumbristas.

Las simulaciones consistieron en la utilización de manera articulada de todas aquellas personas, instituciones y herramientas o los medios disponibles para probar que tan bien funciona el SAT propuesto (información de satélite, medios de comunicación, internet, etc) ante la posible presencia u ocurrencia del evento extremo.

Estas simulaciones permitieron verificar el grado de funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana implementado y como es la participación de los componentes de cada comunidad.

Figura 12. Diagrama de flujo – Activación del Sistema de Alerta Temprana para Descargas Eléctricas Atmosféricas



IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 GEOREFERENCIACION DE PUNTOS DE DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFÉRICAS

Las localizaciones de las descargas eléctricas atmosféricas fueron posibles gracias a la información de rayos proporcionada por el STARNET, que fueron seleccionados teniendo en consideración un radio máximo de 10 km a los alrededores de las comunidades campesinas de Marcapomacocha y Huayao además de considerar un intervalo de tiempo de 20 minutos entre el primer y último rayo detectado alrededor del tiempo donde se tiene la imagen de satélite respectiva.

Se trazó una circunferencia imaginaria de 10 km de radio y se consideraron solo aquellas descargas que tuvieron ocurrencia dentro de esa distancia alrededor de la comunidad campesina.

Para las estaciones meteorológicas de Marcapomacocha y Huayao se lograron georeferenciar 911 y 189 descargas eléctricas respectivamente y que corresponden a la ocurrencia entre junio del 2015 a noviembre del 2017 (Ver anexo 12 y 13).

Cuadro 4. Ejemplo de datos del STARNET con localizaciones de descargas de rayos

Año	Mes	Día	Hora	Min	Segundo	Latitud	Longitud	
2016	10	1	12	50	7	627704	-10.343580	-75.040510
2016	10	1	12	54	45	243016	-10.566250	-75.004450
2016	10	1	12	59	16	340497	-10.439140	-75.085300
2016	10	1	12	59	16	424752	-10.434270	-75.052310
2016	10	1	12	59	16	500473	-10.443020	-75.049510
2016	10	1	12	59	16	569785	-10.447570	-75.063010
2016	10	1	13	12	50	89581	-10.441550	-75.047000
2016	10	1	13	16	22	857299	-10.382940	-75.239650
2016	10	1	13	17	13	613572	-10.322110	-75.292950
2016	10	1	13	17	6	64796	-10.447310	-75.084690
2016	10	1	13	20	21	566292	-10.050710	-75.092070
2016	10	1	13	32	4	96897	-10.432840	-75.225140

4.2 DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO ENTRE LA BANDA DE VAPOR DE AGUA E INFRARROJO

Para esta sección se utilizaron los archivos NetCDF de las imágenes de satélite del GOES 13 para el vapor de agua (banda 3) e Infrarrojo (banda 4) con los que fue posible extraer las temperatura de brillo de las respectivas bandas.

Teniendo como base la información georeferenciada de descargas eléctricas atmosféricas del STARNET así como el momento de ocurrencia de los mismos y utilizando un script (Anexo 1) para el visualizador GRADS, se extrajeron las temperaturas de brillo en la banda de vapor de agua (banda 3) e infrarroja (banda 4) del satélite GOES13 respectivamente, con esta idea se aproximó el momento de ocurrencia de la descarga con la hora de emisión de la imagen de satélite correspondiente con la intención de recrear las condiciones nubosas que posibilitaron las descargas eléctricas en estudio.

4.2.1 TRATAMIENTO DE DATOS

a. Comunidad campesina de Marcapomacocha

Cuadro 5: “datos1” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha

CASO	DISTANCIA	TIEMPO	AÑO	MES	DIA	HORA	MINUTO	LATITUD	LONGITUD	IR3	IR4	DIF
1	0.00000	2015-06-13 08:47:00	2015	6	13	8	47	-11.42089	-76.30486	-18.76	-3.26	15.50
2	10509.12418	2015-06-13 08:53:00	2015	6	13	8	53	-11.44129	-76.39890	-19.16	-2.64	16.52
3	7389.22982	2015-06-13 10:08:00	2015	6	13	10	8	-11.38208	-76.36829	-18.76	-3.88	14.88
4	9413.05540	2015-06-28 11:10:00	2015	6	28	11	10	-11.45807	-76.33045	-20.36	-4.50	15.86
5	7651.42313	2015-06-30 23:05:00	2015	6	30	23	5	-11.39864	-76.36568	-26.56	-16.58	9.98
6	2190.84282	2015-07-22 23:25:00	2015	7	22	23	25	-11.38210	-76.35480	-37.08	-27.82	9.26
7	5750.88410	2015-08-05 23:00:00	2015	8	5	23	0	-11.39690	-76.30431	-20.55	5.80	26.35
8	5465.11196	2015-08-12 18:31:00	2015	8	12	18	31	-11.43058	-76.34075	-31.22	-19.86	11.36
9	9909.22649	2015-08-12 20:10:00	2015	8	12	20	10	-11.42129	-76.25043	-31.76	-23.73	8.03
9	14288.13195	2015-08-12 20:18:00	2015	8	12	20	18	-11.35002	-76.35932	-29.12	-18.37	10.75
9	16643.16470	2015-08-12 20:22:00	2015	8	12	20	22	-11.46329	-76.25977	-26.67	-16.18	10.49
10	4493.23730	2015-08-12 20:23:00	2015	8	12	20	23	-11.43081	-76.28422	-24.81	-4.18	20.63
11	4556.14415	2015-08-15 00:59:00	2015	8	15	0	59	-11.40898	-76.24890	-25.27	-13.36	11.91
12	10073.81873	2015-08-19 07:54:00	2015	8	19	7	54	-11.46639	-76.32027	-23.05	-3.56	19.49
13	12880.12896	2015-08-19 08:40:00	2015	8	19	8	40	-11.38949	-76.40847	-23.92	-4.81	19.11
14	12733.32066	2015-08-20 01:12:00	2015	8	20	1	12	-11.47192	-76.32756	-24.81	-10.63	14.18

Tal como se indica en la metodología, el nuevo conjunto de datos generados llamado “datos1” que se muestra en el cuadro 5, tiene en las 3 primeras columnas de la izquierda las nuevas variables CASO, DISTANCIA y TIEMPO. La variable CASO hace referencia al

número ordinal de las nubes, es decir, va enumerando a cada nube por cantidad de descargas. Por ejemplo se tienen 3 descargas emitidas por la nube 9.

Cuadro 6: “datos2” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha

CASO	FECHA	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS
1	2015-06-13 08:47:00	15.50	15.50	15.500000	15.500	1
2	2015-06-13 08:53:00	16.52	16.52	16.520000	16.520	1
3	2015-06-13 10:08:00	14.88	14.88	14.880000	14.880	1
4	2015-06-28 11:10:00	15.86	15.86	15.860000	15.860	1
5	2015-06-30 23:05:00	9.98	9.98	9.980000	9.980	1
6	2015-07-22 23:25:00	9.26	9.26	9.260000	9.260	1
7	2015-08-05 23:00:00	26.35	26.35	26.350000	26.350	1
8	2015-08-12 18:31:00	11.36	11.36	11.360000	11.360	1
9	2015-08-12 20:18:00	8.03	10.75	9.756667	10.490	3
10	2015-08-12 20:23:00	20.63	20.63	20.630000	20.630	1
11	2015-08-15 00:59:00	11.91	11.91	11.910000	11.910	1
12	2015-08-19 07:54:00	19.49	19.49	19.490000	19.490	1
13	2015-08-19 08:40:00	19.11	19.11	19.110000	19.110	1
14	2015-08-20 01:12:00	14.18	14.18	14.180000	14.180	1
15	2015-08-20 06:56:00	20.76	20.76	20.760000	20.760	1
16	2015-08-20 17:39:00	18.30	18.30	18.300000	18.300	1

Lectura de un caso: Del cuadro 6 se observa que de la nube 9 se han emitido 3 descargas eléctricas en un rango de tiempo de aproximadamente 5 minutos. La TB3-TB4 mínima de estas descargas es 8.03°C, la máxima es 10.75°C, el promedio es 9.75°C y la mediana es 10.49°C. Sin embargo también podemos observar que la nube 10 emite un rayo en el periodo de tiempo cercano al anterior pero con diferencia de temperatura de brillo que está del orden de 20 °C en valor absoluto.

Cuadro 7: “datos3” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha

HORA	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS_MIN	DESCARGAS_MAX	DESCARGAS_AVG	DESCARGAS_MED	DESCARGAS_SUM	
1	2015-06-13 08:00:00	16.010000	16.010000	16.010000	16.010000	1	1	1.000000	1.0	2
2	2015-06-13 10:00:00	14.880000	14.880000	14.880000	14.880000	1	1	1.000000	1.0	1
3	2015-06-28 11:00:00	15.860000	15.860000	15.860000	15.860000	1	1	1.000000	1.0	1
4	2015-06-30 23:00:00	9.980000	9.980000	9.980000	9.980000	1	1	1.000000	1.0	1
5	2015-07-22 23:00:00	9.260000	9.260000	9.260000	9.260000	1	1	1.000000	1.0	1
6	2015-08-05 23:00:00	26.350000	26.350000	26.350000	26.350000	1	1	1.000000	1.0	1
7	2015-08-12 18:00:00	11.360000	11.360000	11.360000	11.360000	1	1	1.000000	1.0	1
8	2015-08-12 20:00:00	14.330000	15.690000	15.193333	15.560000	1	3	2.000000	2.0	4
9	2015-08-15 00:00:00	11.910000	11.910000	11.910000	11.910000	1	1	1.000000	1.0	1
10	2015-08-19 07:00:00	19.490000	19.490000	19.490000	19.490000	1	1	1.000000	1.0	1
11	2015-08-19 08:00:00	19.110000	19.110000	19.110000	19.110000	1	1	1.000000	1.0	1
12	2015-08-20 01:00:00	14.180000	14.180000	14.180000	14.180000	1	1	1.000000	1.0	1
13	2015-08-20 06:00:00	20.760000	20.760000	20.760000	20.760000	1	1	1.000000	1.0	1
14	2015-08-20 17:00:00	18.300000	18.300000	18.300000	18.300000	1	1	1.000000	1.0	1
15	2015-08-22 22:00:00	11.450000	11.450000	11.450000	11.450000	1	1	1.000000	1.0	1
16	2015-08-22 23:00:00	11.490000	11.490000	11.490000	11.490000	1	1	1.000000	1.0	1

Lectura de un caso: El cuadro 7 muestra a los datos condensados por horas. Del cuadro 6, se observa que tanto las 3 descargas de la nube 9 y la única descarga de la nube 10, ocurren dentro de la hora 20, por lo que el acumulado para esa hora serían 4 descargas (DESCARGAS_SUM). Para esta misma hora, el mínimo número de descargas por nube es 1 (de la nube 10), y el máximo 3 (de la nube 9). El número promedio de descargas es 2 y la mediana 2. La TB3-TB4 mínima de estas descargas es 14.33°C, la máxima es 15.69°C, el promedio es 15.19°C y la mediana es 15.56°C.

Cuadro 8: “datos4” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha

DIA	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS_MIN	DESCARGAS_MAX	DESCARGAS_AVG	DESCARGAS_MED	DESCARGAS_SUM
2015-06-13	15.633333	15.633333	15.633333	15.633333		1	1.000000	1.0	3
2015-06-28	15.860000	15.860000	15.860000	15.860000		1	1.000000	1.0	1
2015-06-30	9.980000	9.980000	9.980000	9.980000		1	1.000000	1.0	1
2015-07-22	9.260000	9.260000	9.260000	9.260000		1	1.000000	1.0	1
2015-08-05	26.350000	26.350000	26.350000	26.350000		1	1.000000	1.0	1
2015-08-12	13.340000	14.246667	13.915556	14.160000		3	1.666667	1.0	5
2015-08-15	11.910000	11.910000	11.910000	11.910000		1	1.000000	1.0	1
2015-08-19	19.300000	19.300000	19.300000	19.300000		1	1.000000	1.0	2
2015-08-20	17.746667	17.746667	17.746667	17.746667		1	1.000000	1.0	3
2015-08-22	11.470000	11.470000	11.470000	11.470000		1	1.000000	1.0	2
2015-08-23	12.140000	12.600000	12.370000	12.370000		2	2.000000	2.0	2
2015-08-26	25.750000	26.820000	26.285000	26.285000		2	2.000000	2.0	2
2015-08-29	26.590000	26.590000	26.590000	26.590000		1	1.000000	1.0	1
2015-09-03	29.410000	29.410000	29.410000	29.410000		1	1.000000	1.0	1
2015-09-04	16.410000	16.410000	16.410000	16.410000		1	1.000000	1.0	1
2015-09-06	9.880000	10.480000	10.180000	10.180000		2	1.500000	1.5	3

Lectura de un caso: El cuadro 8 muestra a los datos condensados por día que serían 5 descargas (DESCARGAS_SUM) para el día 12. Para este mismo día, el mínimo número de descargas por nube es 1 y el máximo 3. El número promedio de descargas es 1.66 y la mediana 1.

La TB3-TB4 mínima de estas descargas es 13.34°C, la máxima es 14.24°C, el promedio es 13.91°C y la mediana es 14.16°C.

Cuadro 9: “datos5” generados para comunidad campesina de Marcapomacocha

MES	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS_MIN	DESCARGAS_MAX	DESCARGAS_AVG	DESCARGAS_MED	DESCARGAS_SUM
1 2015-06	14.548000	14.548000	14.548000	14.548000	1	1	1.000000	1	5
2 2015-07	9.260000	9.260000	9.260000	9.260000	1	1	1.000000	1	1
3 2015-08	17.169333	17.452667	17.335444	17.384333	1	3	1.266667	1	19
4 2015-09	14.131429	14.702143	14.386295	14.343750	1	12	2.107143	1	59
5 2015-10	15.477667	16.118667	15.833033	15.873500	1	5	1.566667	1	47
6 2015-11	6.960800	7.306800	7.121067	7.095600	1	3	1.440000	1	36
7 2015-12	12.600000	12.640000	12.620000	12.620000	1	2	1.076923	1	14
8 2016-01	14.463846	14.886923	14.690075	14.680577	1	8	1.634615	1	85
9 2016-02	12.695366	13.214878	12.953313	12.950488	1	4	1.463415	1	60
10 2016-03	14.007674	14.530930	14.260953	14.257674	1	10	1.790698	1	77
11 2016-04	14.382381	14.894762	14.636833	14.622143	1	5	1.809524	1	38
12 2016-05	15.794444	16.068889	15.975741	16.010000	1	6	1.555556	1	14
13 2016-06	18.274444	18.591111	18.442315	18.461389	1	3	1.222222	1	22
14 2016-08	14.948846	15.196154	15.062372	15.042115	1	3	1.192308	1	31
15 2016-10	9.848000	9.985333	9.936000	9.974667	1	3	1.133333	1	17
16 2016-11	11.976250	12.175000	12.108750	12.175000	1	3	1.250000	1	10

Lectura de un caso: el cuadro 9 muestra a los datos condensados por mes. En el mes 8 del año 2015 se han dado 19 descargas (DESCARGAS_SUM). Para este mismo mes, el mínimo número de descargas por nube es 1 y el máximo 3. El número promedio de descargas es 1.26 y la mediana 1.

b. Comunidad Campesina de Huayao

Cuadro 10: “datos1” generados para comunidad campesina de Huayao

CASO	DISTANCIA	TIEMPO	AÑO	MES	DIA	HORA	MINUTO	LATITUD	LONGITUD	IR3	IR4	DIF
1	0.0000	2015-06-02 22:33:00	2015	6	2	22	33	-11.98025	-75.32318	-31.73	-13.74	17.99
2	5067.2517	2015-06-02 22:56:00	2015	6	2	22	56	-11.95913	-75.36440	-33.44	-25.82	7.62
3	2966.0725	2015-06-11 09:23:00	2015	6	11	9	23	-11.96409	-75.33764	-22.03	1.54	23.57
4	6329.1697	2015-06-12 09:27:00	2015	6	12	9	27	-11.96924	-75.39552	-19.96	-1.43	18.53
5	13939.6355	2015-07-04 11:36:00	2015	7	4	11	36	-11.98790	-75.26894	-22.46	0.37	22.83
6	5010.1865	2015-08-13 21:32:00	2015	8	13	21	32	-11.98626	-75.31492	-34.02	-27.82	6.20
7	2869.0015	2015-08-13 21:52:00	2015	8	13	21	52	-11.98719	-75.28859	-32.87	-26.98	5.89
7	2328.8534	2015-08-13 21:56:00	2015	8	13	21	56	-11.98802	-75.30996	-33.44	-27.82	5.62
7	4858.6733	2015-08-13 22:03:00	2015	8	13	22	3	-11.95682	-75.34116	-33.44	-27.82	5.62
8	1963.4701	2015-08-13 22:28:00	2015	8	13	22	28	-11.97024	-75.32946	-29.12	-20.62	8.50
9	1038.7356	2015-09-06 22:44:00	2015	9	6	22	44	-11.96664	-75.32066	-26.19	-16.90	9.29
10	4906.0093	2015-09-09 10:04:00	2015	9	9	10	4	-11.98718	-75.28080	-15.99	3.55	19.54
10	965.9369	2015-09-09 10:04:00	2015	9	9	10	4	-11.99281	-75.27405	-15.99	3.55	19.54
10	1319.5918	2015-09-09 10:04:00	2015	9	9	10	4	-11.98767	-75.28497	-15.99	3.55	19.54
11	3351.4513	2015-09-13 00:42:00	2015	9	13	0	42	-11.99520	-75.31477	-24.81	-9.96	14.85
12	4111.8941	2015-09-13 02:12:00	2015	9	13	2	12	-11.95869	-75.30904	-28.62	-15.47	13.15
13	11558.5758	2015-09-19 23:33:00	2015	9	19	23	33	-11.98785	-75.41091	-32.87	-25.34	7.53
14	1513.5953	2015-09-19 23:49:00	2015	9	19	23	49	-11.97753	-75.40186	-45.87	-40.80	5.07

Tal como se indica en la metodología, los nuevos datos generados llamados “datos1” que se muestra en el cuadro 10, tiene en las 3 primeras columnas de la izquierda las nuevas variables CASO, DISTANCIA y TIEMPO. La variable CASO hace referencia al número ordinal de las nubes, es decir, va enumerando a cada nube por cantidad de descargas. Por ejemplo se tienen 3 descargas emitidas por la nube 7.

Cuadro 11: “datos2” generados para comunidad campesina de Huayao

CASO	FECHA	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS
1	2015-06-02 22:33:00	17.99	17.99	17.990000	17.990	1
2	2015-06-02 22:56:00	7.62	7.62	7.620000	7.620	1
3	2015-06-11 09:23:00	23.57	23.57	23.570000	23.570	1
4	2015-06-12 09:27:00	18.53	18.53	18.530000	18.530	1
5	2015-07-04 11:36:00	22.83	22.83	22.830000	22.830	1
6	2015-08-13 21:32:00	6.20	6.20	6.200000	6.200	1
7	2015-08-13 21:56:00	5.62	5.89	5.710000	5.620	3
8	2015-08-13 22:28:00	8.50	8.50	8.500000	8.500	1
9	2015-09-06 22:44:00	9.29	9.29	9.290000	9.290	1
10	2015-09-09 10:04:00	19.54	19.54	19.540000	19.540	3
11	2015-09-13 00:42:00	14.85	14.85	14.850000	14.850	1
12	2015-09-13 02:12:00	13.15	13.15	13.150000	13.150	1
13	2015-09-19 23:33:00	7.53	7.53	7.530000	7.530	1

Lectura de un caso: en el cuadro 11 podemos observar que de la nube 7 se han emitido 3 descargas eléctricas. La TB3-TB4 mínima de estas descargas es 5.62°C, la máxima es 5.89°C, el promedio es 5.89°C y la mediana es 5.62°C.

Cuadro 12: “datos3” generados para comunidad campesina de Huayao

HORA	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS_MIN	DESCARGAS_MAX	DESCARGAS_AVG	DESCARGAS_MED	DESCARGAS_SUM
2015-06-02 22:00:00	12.80500	12.805000	12.805000	12.805000	1	1	1.000000	1.0	2
2015-06-11 09:00:00	23.57000	23.570000	23.570000	23.570000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-06-12 09:00:00	18.53000	18.530000	18.530000	18.530000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-07-04 11:00:00	22.83000	22.830000	22.830000	22.830000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-08-13 21:00:00	5.91000	6.045000	5.955000	5.910000	1	3	2.000000	2.0	4
2015-08-13 22:00:00	8.50000	8.500000	8.500000	8.500000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-09-06 22:00:00	9.29000	9.290000	9.290000	9.290000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-09-09 10:00:00	19.54000	19.540000	19.540000	19.540000	3	3	3.000000	3.0	3
2015-09-13 00:00:00	14.85000	14.850000	14.850000	14.850000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-09-13 02:00:00	13.15000	13.150000	13.150000	13.150000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-09-19 23:00:00	6.04000	6.300000	6.170000	6.170000	1	2	1.500000	1.5	3
2015-10-20 21:00:00	3.66000	3.660000	3.660000	3.660000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-11-06 00:00:00	1.14000	1.140000	1.140000	1.140000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-11-07 22:00:00	14.43333	14.840000	14.636667	14.636667	1	2	1.333333	1.0	4
2015-11-09 00:00:00	2.33000	2.330000	2.330000	2.330000	1	1	1.000000	1.0	1

Lectura de un caso: el cuadro 12 muestra a los datos condensados por horas. Del cuadro 11, se observa que tanto las 3 descargas de la nube 7 y la única descarga de la nube 6, se dan dentro de la hora 21, por lo que el acumulado para esa hora serían 4 descargas (DESCARGAS_SUM). Para esta misma hora, el mínimo número de descargas por nube es 1 (de la nube 6), y el máximo 3 (de la nube 7). El número promedio de descargas es 2 y la mediana 2. La TB3-TB4 mínima de estas descargas es 5.91°C, la máxima es 6.04°C, el promedio es 5.95°C y la mediana es 5.91°C.

Cuadro 13: “datos4” generados para comunidad campesina de Huayao

DIA	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS_MIN	DESCARGAS_MAX	DESCARGAS_AVG	DESCARGAS_MED	DESCARGAS_SUM
2015-06-02	12.805000	12.805000	12.805000	12.805000	1	1	1.000000	1.0	2
2015-06-11	23.570000	23.570000	23.570000	23.570000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-06-12	18.530000	18.530000	18.530000	18.530000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-07-04	22.830000	22.830000	22.830000	22.830000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-08-13	6.773333	6.863333	6.803333	6.773333	1	3	1.666667	1.0	5
2015-09-06	9.290000	9.290000	9.290000	9.290000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-09-09	19.540000	19.540000	19.540000	19.540000	3	3	3.000000	3.0	3
2015-09-13	14.000000	14.000000	14.000000	14.000000	1	1	1.000000	1.0	2
2015-09-19	6.040000	6.300000	6.170000	6.170000	1	2	1.500000	1.5	3
2015-10-20	3.660000	3.660000	3.660000	3.660000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-11-06	1.140000	1.140000	1.140000	1.140000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-11-07	14.433333	14.840000	14.636667	14.636667	1	2	1.333333	1.0	4
2015-11-09	2.330000	2.330000	2.330000	2.330000	1	1	1.000000	1.0	1

Lectura de un caso: en el cuadro 13 se muestran a los datos condensados por día. Por ejemplo, serían 5 descargas (DESCARGAS_SUM) para el día 13. Para este mismo día, el

mínimo número de descargas por nube es 1 y el máximo 3. El número promedio de descargas es 1.66 y la mediana 1.

La TB3-TB4 mínima de estas descargas es 6.77°C, la máxima es 6.86°C, el promedio es 6.83°C y la mediana es 6.77°C.

Cuadro 14: “datos5” generados para comunidad campesina de Huayao

MES	DIF_MIN	DIF_MAX	DIF_AVG	DIF_MED	DESCARGAS_MIN	DESCARGAS_MAX	DESCARGAS_AVG	DESCARGAS_MED	DESCARGAS_SUM
2015-06	16.927500	16.927500	16.927500	16.927500	1	1	1.000000	1.0	4
2015-07	22.830000	22.830000	22.830000	22.830000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-08	6.773333	6.863333	6.803333	6.773333	1	3	1.666667	1.0	5
2015-09	11.485000	11.571667	11.528333	11.528333	1	3	1.500000	1.0	9
2015-10	3.660000	3.660000	3.660000	3.660000	1	1	1.000000	1.0	1
2015-11	7.257778	7.552222	7.405000	7.405000	1	2	1.222222	1.0	11
2015-12	12.296667	12.296667	12.296667	12.296667	1	2	1.333333	1.0	4
2016-01	7.075385	7.394615	7.188504	7.143462	1	9	2.076923	1.0	27
2016-02	13.440769	13.467692	13.462308	13.467692	1	5	1.307692	1.0	17
2016-03	14.119091	14.194545	14.156818	14.156818	1	3	1.363636	1.0	15
2016-04	9.105000	10.750000	10.020833	10.207500	2	3	2.500000	2.5	5
2016-05	17.793333	17.793333	17.793333	17.793333	1	1	1.000000	1.0	3
2016-06	23.205000	23.205000	23.205000	23.205000	1	1	1.000000	1.0	2
2016-07	25.200000	25.200000	25.200000	25.200000	1	1	1.000000	1.0	1

Lectura de un caso: en el cuadro 14 se muestran los datos condensados por mes. En el mes 8 se han dado 5 descargas (DESCARGAS_SUM). Para este mismo mes, el mínimo número de descargas por nube es 1 y el máximo 3. El número promedio de descargas es 1.66 y la mediana 1.

La TB3-TB4 mínima de estas descargas es 6.77°C, la máxima es 6.86°C, el promedio es 6.80°C y la mediana es 6.77°C.

4.2.2 ANÁLISIS DE VARIANZA

a. Comunidad campesina de Marcapomacocha

En la figura 13 se observa que el comportamiento anual de todos los valores máximos de TB3-TB4 por cada nube, no tiene mucha variabilidad y por tanto se le puede considerar como homogénea.

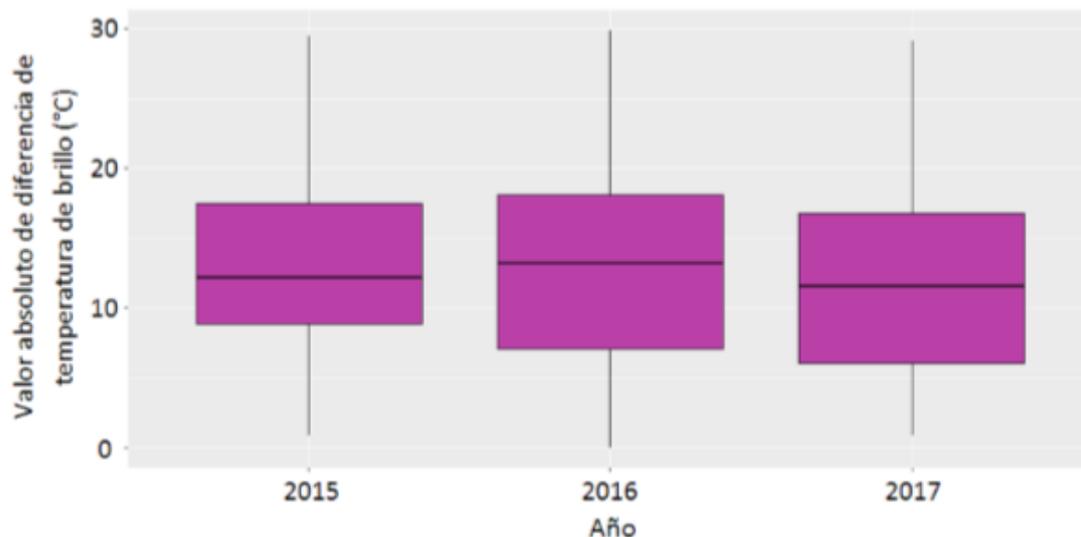


Figura 13. Variabilidad de diferencia máxima por año en la comunidad campesina de Marcapomacocha

En la figura 14 se observa los gráficos box plot y se pueden apreciar que los valores máximos de TB3-TB4 para cada nube, no son homogéneos para todos los meses, puesto que los tamaños de cada caja son diferentes. Sin embargo, se puede notar un patrón estacional dado que las cajas más grandes (meses: D, E, F, M y 4), las medianas (meses: A, S, O y N) y las pequeñas (meses: M, J y J), son de las estaciones de verano-otoño, primavera e invierno respectivamente. Cabe resaltar que en el mes de Julio existe solo un dato recopilado y la causa podría ser la discontinuidad del registro.

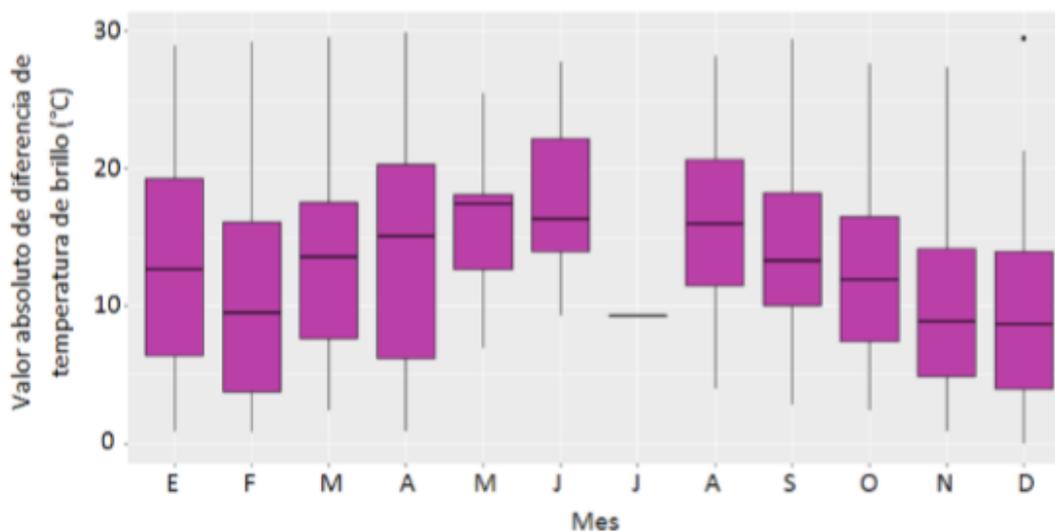


Figura 14. Variabilidad de diferencia máxima por mes en la comunidad campesina de Marcapomacocha

En la figura 15 se observa que existen datos faltantes para los meses de E, F, M, A, M y J del 2015, J y S del 2016 y M, J, J y A el 2017, sin embargo, confirma que la variabilidad de diferencia máxima muestra un patrón estacional.

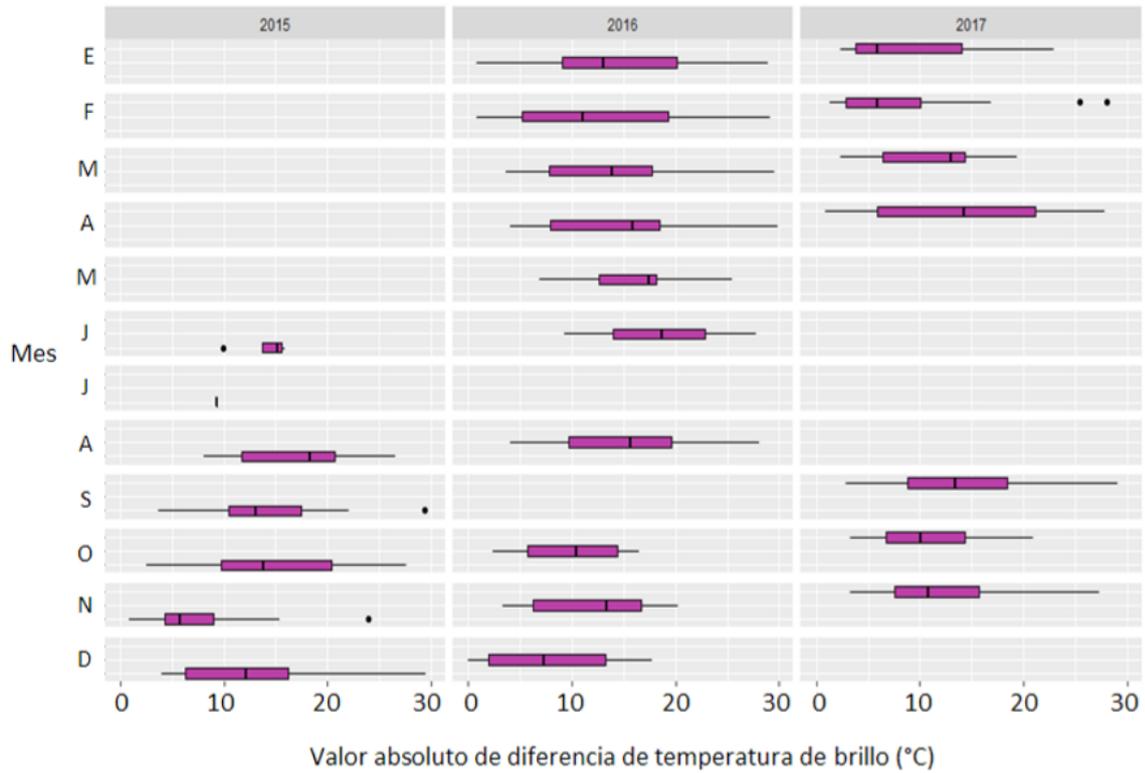


Figura 15. Variabilidad de diferencia máxima por mes y por año en la comunidad campesina de Marcapomacocha

b. Comunidad campesina de Huayao

En la figura 16 se observa que el comportamiento anual de todos los valores máximos de TB3-TB4 por cada nube, no tiene mucha variabilidad y por tanto se puede considerarla como homogénea.

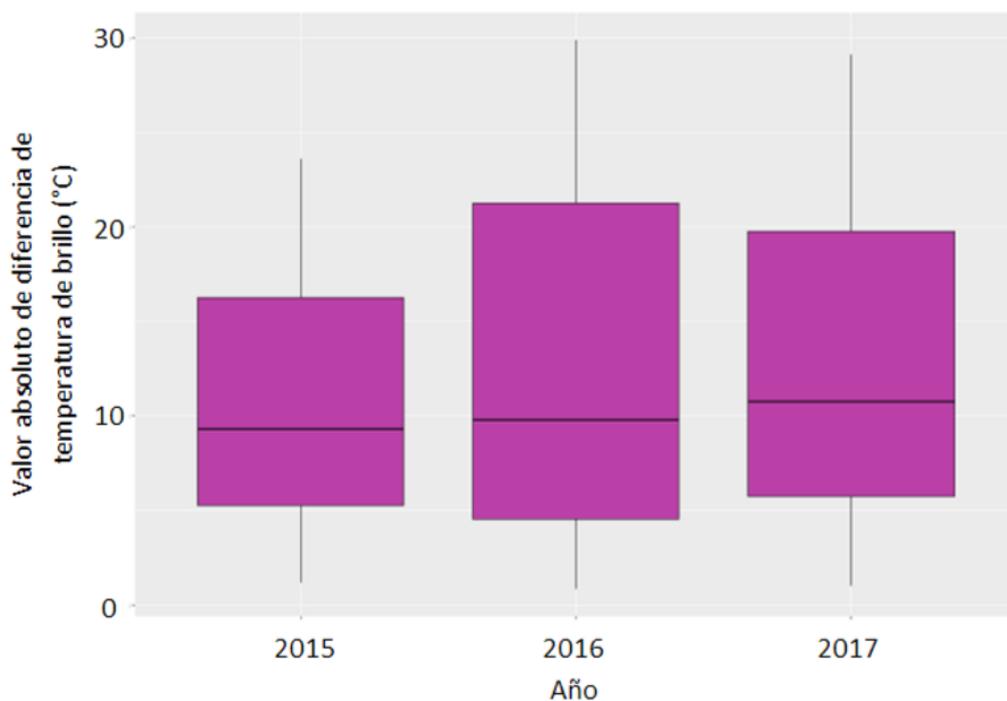


Figura 16. Variabilidad de diferencia máxima por año en la comunidad campesina de Huayao

En la figura 17 se observa, que los valores máximos de TB3-TB4 para cada nube, no son homogéneos para todos los meses, puesto que los tamaños de cada caja son diferentes. Sin embargo, se puede notar un patrón estacional dado que las cajas más grandes son de las estaciones de verano-otoño. Cabe resaltar que en el mes de Julio existe solo un dato recopilado y la causa podría ser la discontinuidad del registro.

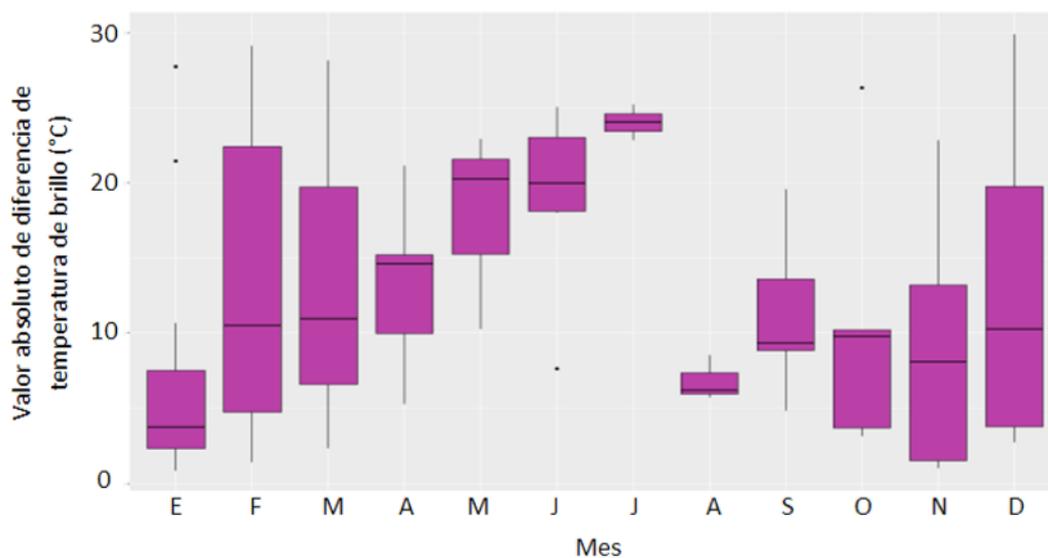


Figura 17. Variabilidad de diferencia máxima por mes en la comunidad campesina de Huayao

En la figura 18 se observa que existen datos faltantes para los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio del 2015; julio, agosto y setiembre del 2016 y mayo, junio, julio, agosto y setiembre del 2017, sin embargo, confirma que la variabilidad de diferencia máxima muestra un patrón estacional.

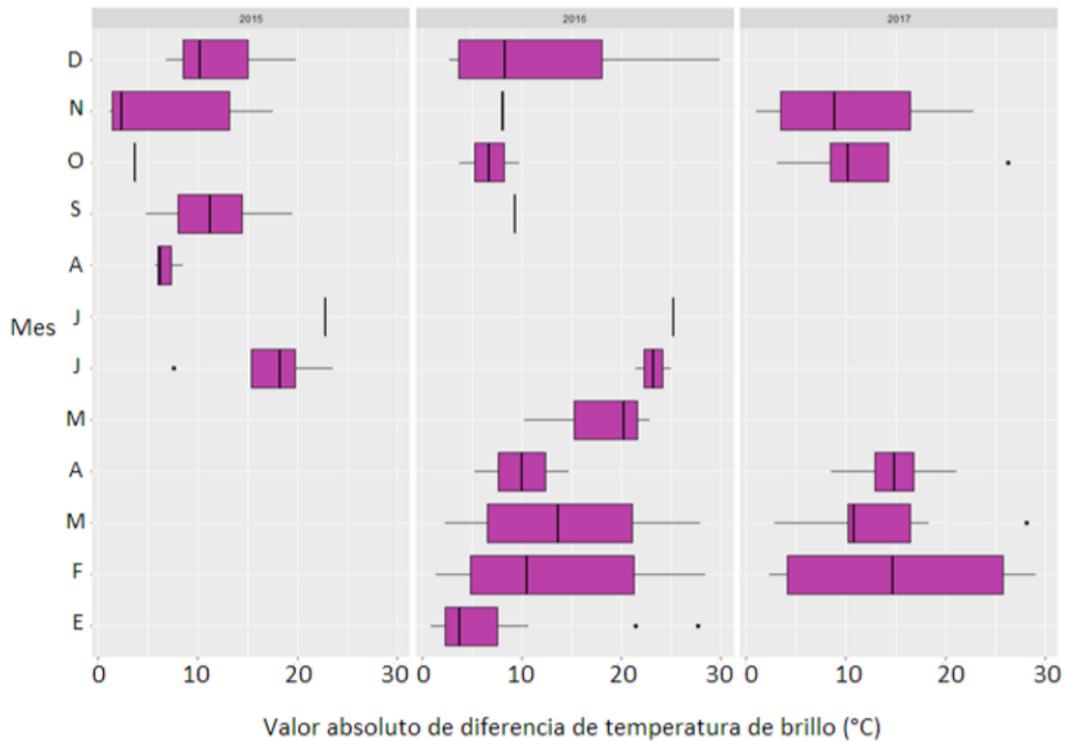


Figura 18. Variabilidad de diferencia máxima por mes y año en la comunidad campesina de Huayao

4.2.2 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES

a. Comunidad campesina de Marcapomacocha

La figura 19 muestra un histograma de todos los valores máximos de TB3-TB4 para cada nube, en donde el eje “x” contiene a todos los valores máximos de TB3-TB4 para cada nube y el eje “y” sus respectivas frecuencias absolutas. Por ejemplo, hay aproximadamente 8 nubes que tienen valores máximos de TB3-TB4 entre 9.8°C y 10.2°C.

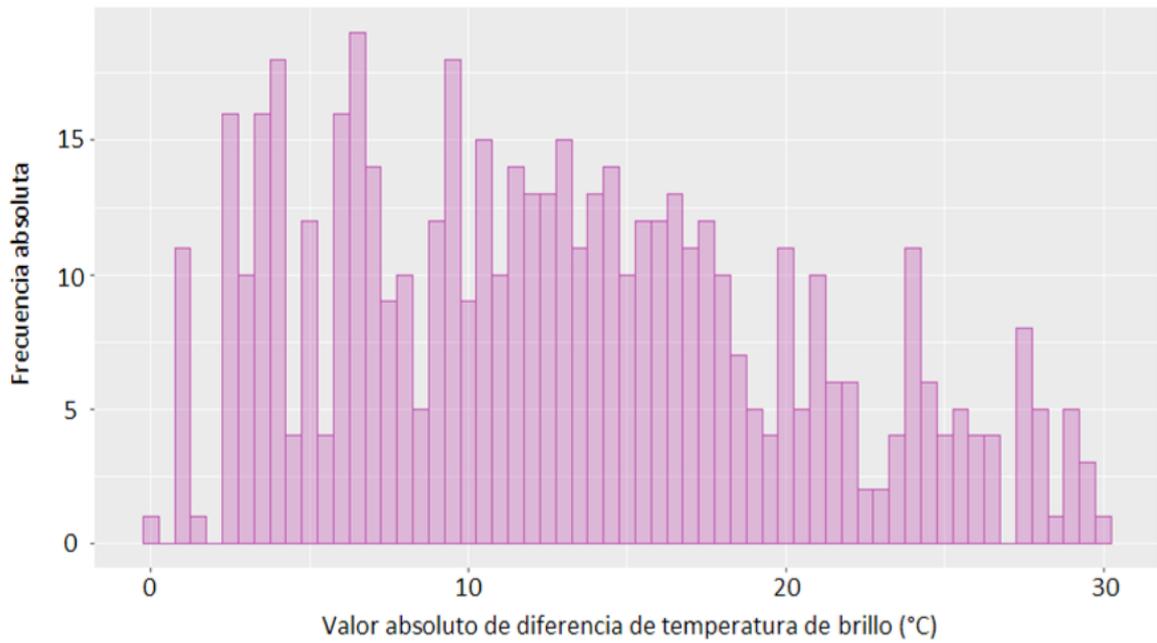


Figura 19. Histograma de todos los valores de diferencia máxima en la comunidad campesina de Marcapomacocha

A simple vista, este histograma de la diferencia máxima podría aproximarse a una distribución Fisher-Snedecor.

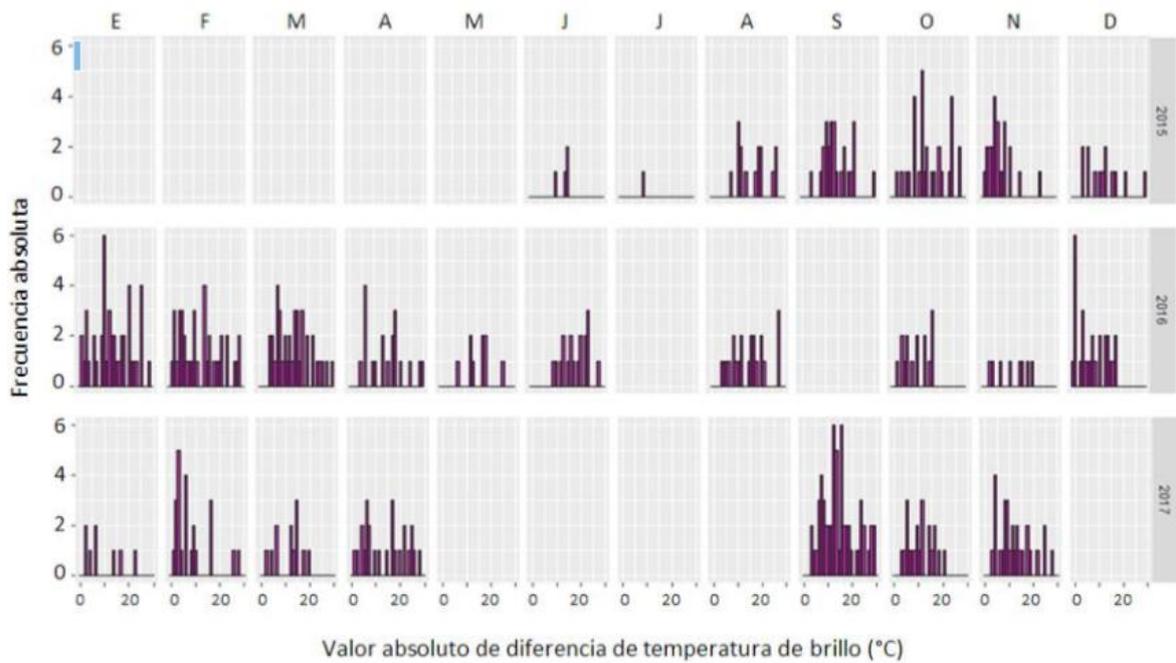


Figura 20. Histogramas de la diferencia máxima por mes y por año en la comunidad campesina de Marcapomacocha

Análogo a los datos totales, los histogramas de la figura 20 muestran una aparente distribución Fisher-Snedecor de la DIF_MAX.

b. Comunidad campesina de Huayao

La figura 21 muestra un histograma de todos los valores máximos de TB-TB4 para cada nube, en donde el eje “x” contiene a todos los valores máximos de TB3-TB4 para cada nube y el eje “y” sus respectivas frecuencias absolutas. Por ejemplo, hay 21 nubes que tienen valores máximos de TB3-TB4 entre -1.70°C y -4.20°C

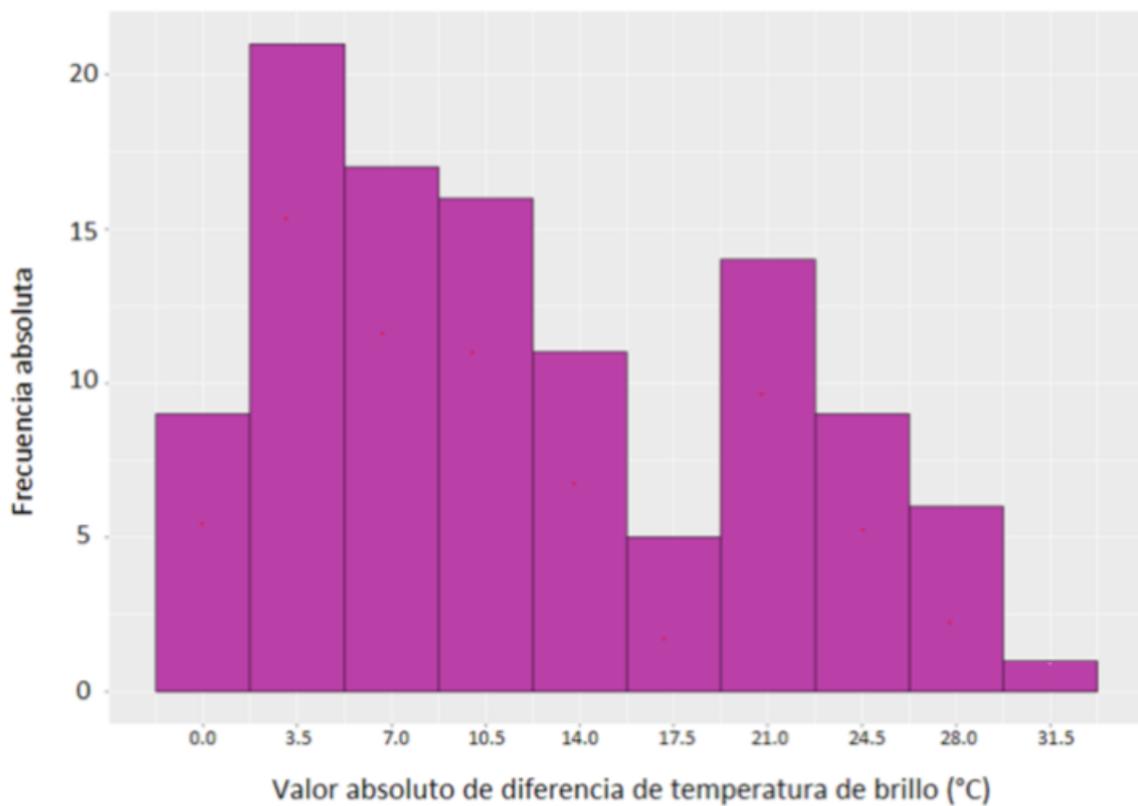


Figura 21. Histograma de todos los valores de diferencia máxima en la comunidad campesina de Huayao

A simple vista, este histograma de la diferencia máxima podría aproximarse a una distribución Fisher-Snedecor.

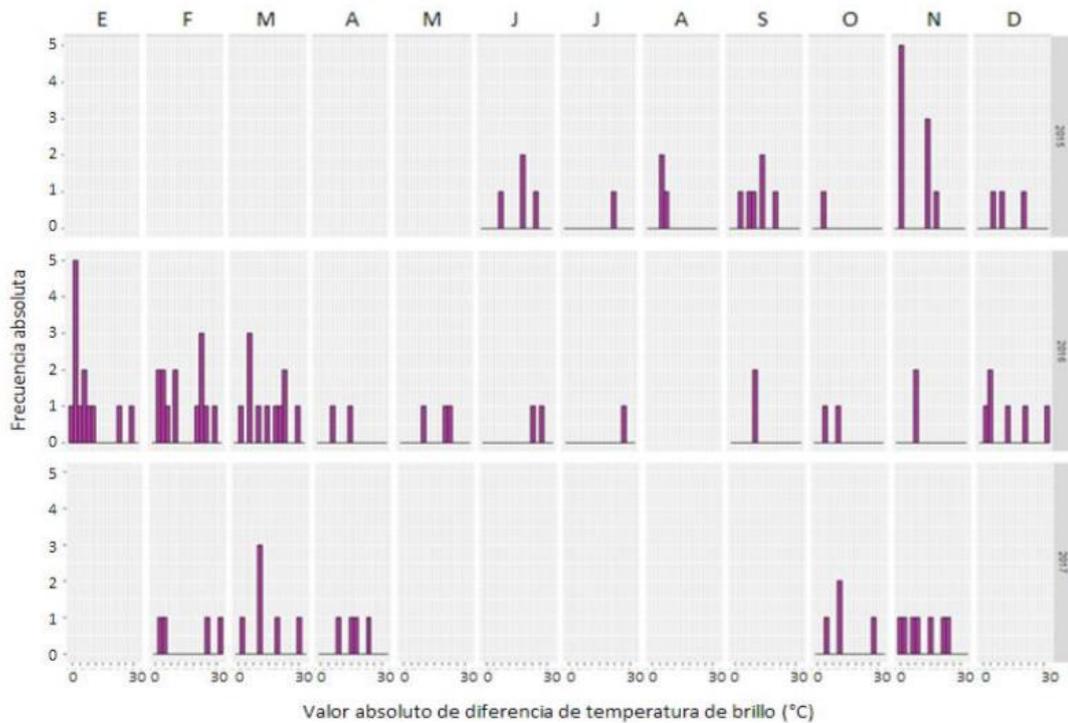


Figura 22. Histogramas de la diferencia máxima por mes y por año en la comunidad campesina de Huayao

Análogo a los datos totales, los histogramas de la figura 22 muestran una aparente distribución Fisher-Snedecor de la diferencia máxima.

4.3 RELACIONES EMPIRICAS Y DE PROBABILIDADES ENTRE LA OCURRENCIA DE DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS Y DIFERENCIA DE TEMPERATURA DE BRILLO

4.3.1 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES

a. Comunidad campesina de Marcapomacocha

Seguidamente se muestra en la figura 23, la distribución de la variable DESCARGAS (cantidad de descargas por nube) por año. Por ejemplo en el año 2016, ha habido 184 nubes que emitieron 1 sola descarga y para el mismo año, ha habido solo 2 nubes que emitieron 10 descargas.

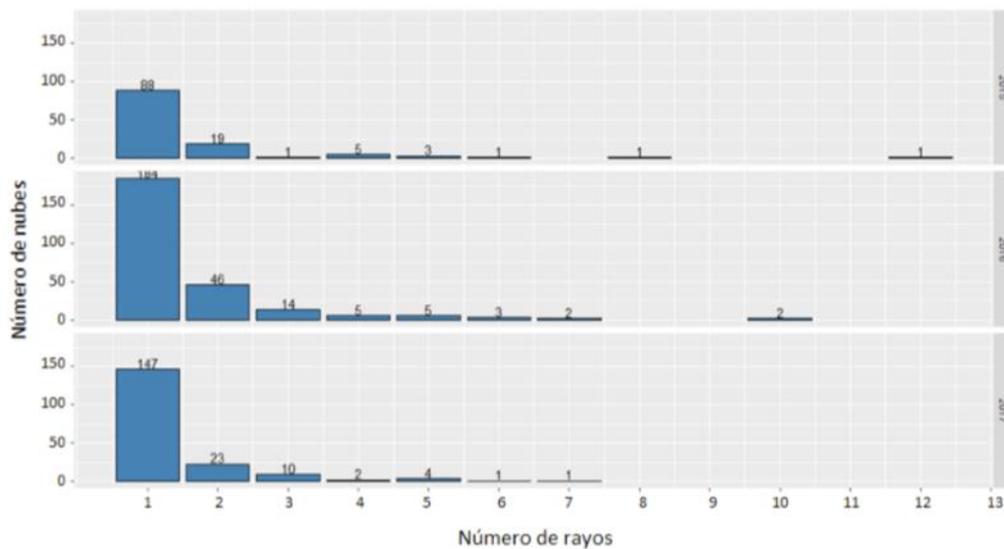


Figura 23. Frecuencia anual para el número de descargas por nubes en la comunidad campesina de Marcapomacocha

De ello se observa que en los tres años, la mayor cantidad de nubes han emitido solo una descarga y que existen muy pocas nubes que han emitido más de 8 descargas.

En la figura 24 se muestra la distribución de la variable DESCARGAS (cantidad de descargas por nube) por mes. Por ejemplo, en el mes octubre, ha habido 56 nubes que emitieron 1 sola descarga. Análogo a la figura anterior se puede observar que la mayor cantidad de nubes han emitido solo una descarga y que existen muy pocas nubes que han emitido más de 6 descargas.

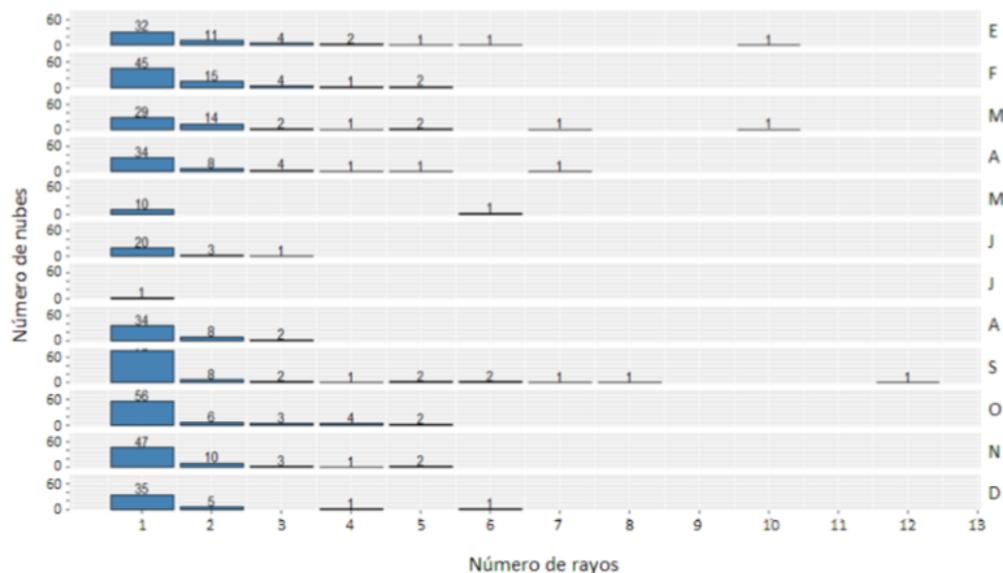


Figura 24. Frecuencia mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Marcapomacocha.

Se observa el mismo patrón de distribución en la figura 25 similares a las figuras 23 y 24 pero con el panorama anual y mensual.

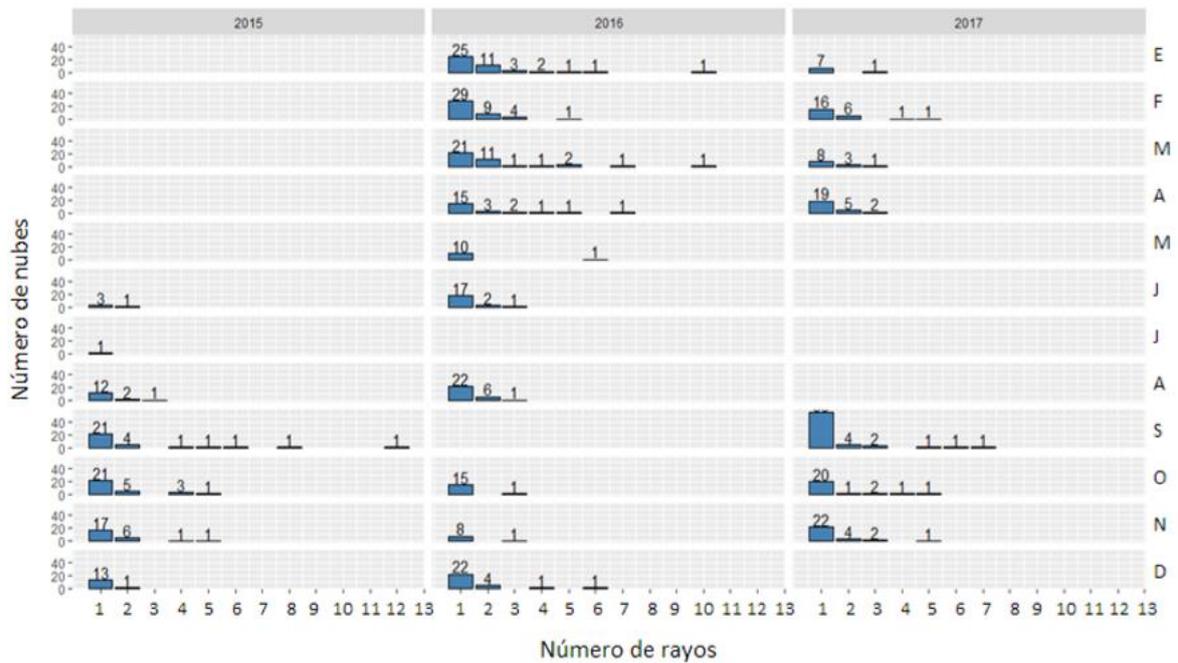


Figura 25. Frecuencia anual y mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Marcapomacocha

b. Comunidad campesina de Huayao

A continuación se muestra en la figura 26, la distribución de la variable DESCARGAS (cantidad de descargas por nube) por año. Por ejemplo en el año 2016, ha habido 46 nubes que emitieron 1 sola descarga. Para el mismo año, ha habido solo 2 nubes que emitieron 6 descargas.

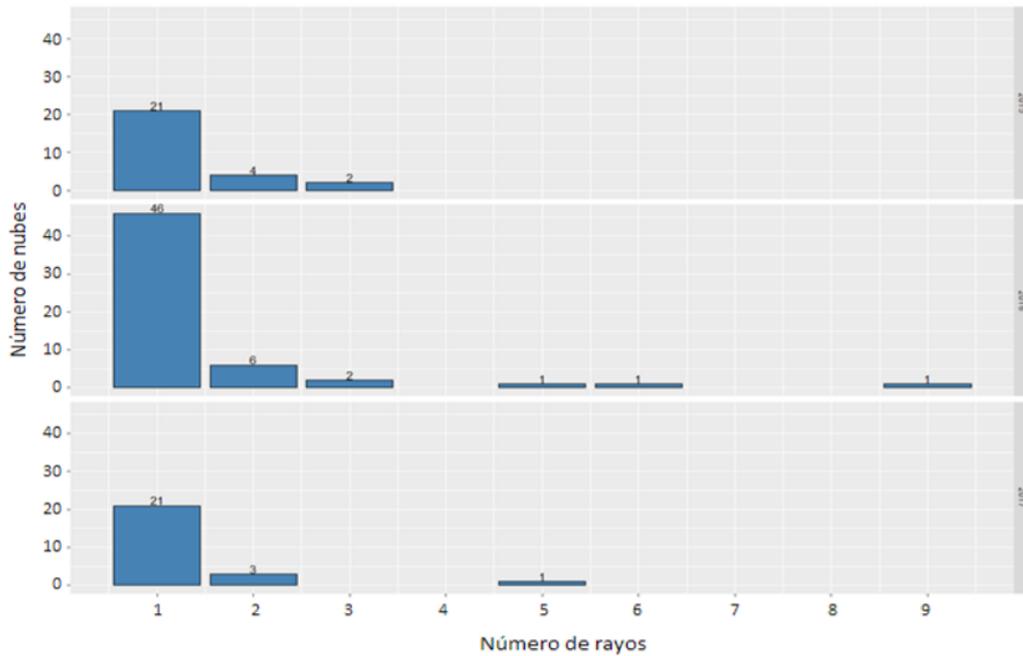


Figura 26. Frecuencia anual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Huayao.

En la figura 27 se muestra la distribución de la variable DESCARGAS (cantidad de descargas por nube) por mes. Por ejemplo, en el mes de octubre, ha habido 56 nubes que emitieron 1 sola descarga. Análogo a la figura anterior se puede concluir que la mayor cantidad de nubes han emitido solo una descarga y que existen muy pocas nubes que han emitido más de 6 descargas.

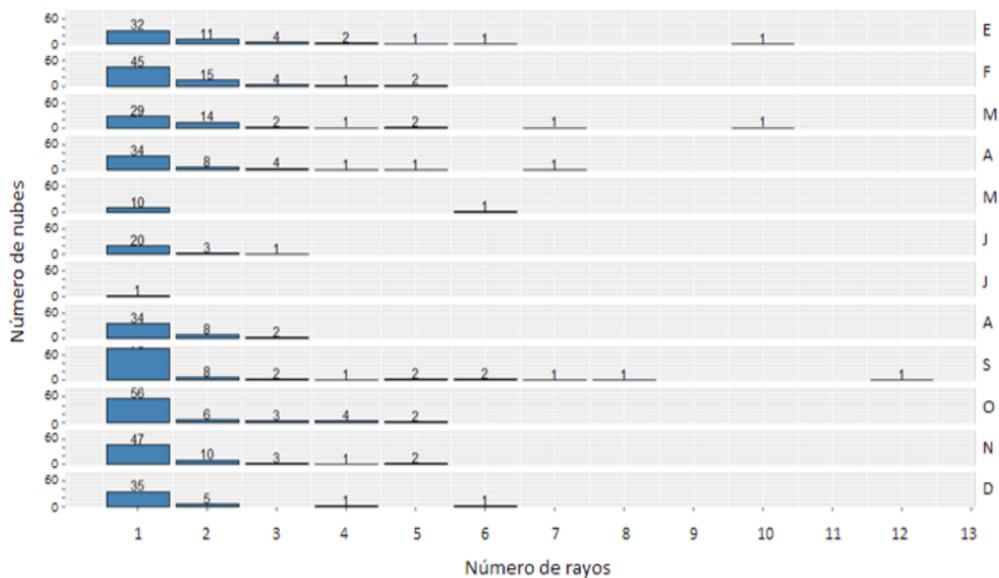


Figura 27. Frecuencia mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Huayao.

En la figura 28 se observa el mismo patrón de distribución de la figura 26 y 27 pero con el panorama mensual y anual.

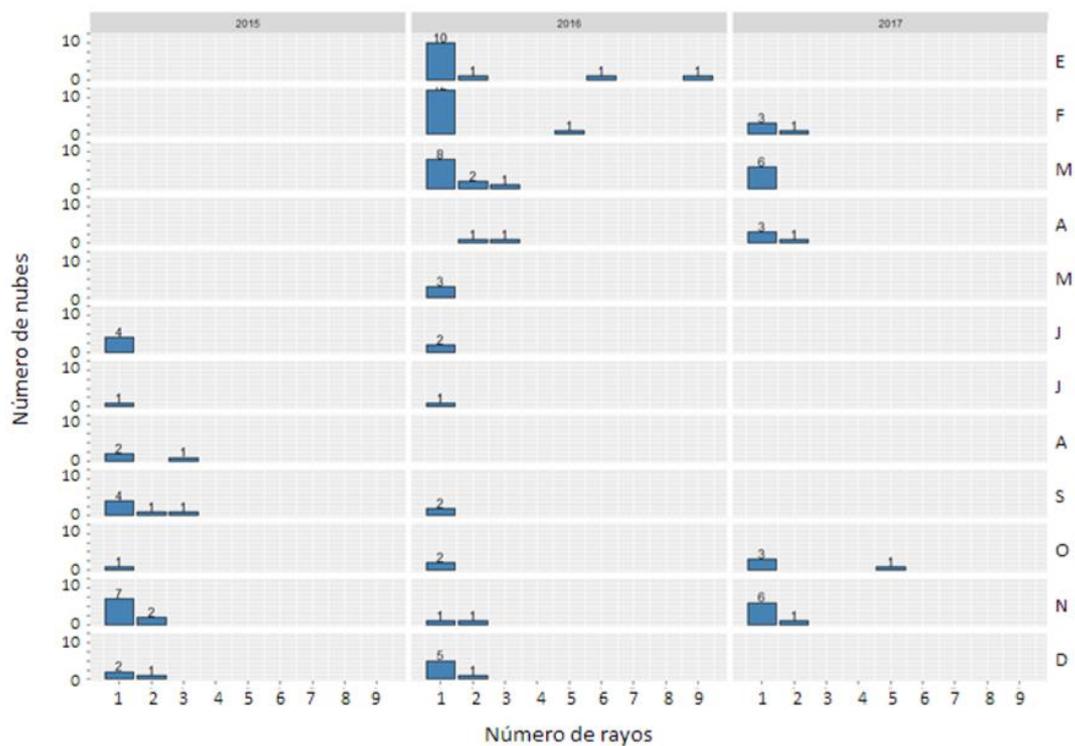


Figura 28. Frecuencia anual y mensual para el número de descargas por nube en la comunidad campesina de Huayao

4.3.2 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES

Los respectivos análisis de correlación resultan de la manera siguiente:

a. Comunidad Campesina de Marcapomacocha

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MINIMA: -0.2060

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MAXIMA: -0.1160

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MEDIA: -0.1610

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MEDIANA: -0.1579

b. Comunidad Campesina de Huayao

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MINIMA: -0.2641

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MAXIMA: -0.2308

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MEDIA: -0.2506

Correlación entre DESCARGAS y DIFERENCIA MEDIANA: -0.2516

Se observa en ambos casos que la relación entre las variables es muy débil con el signo que indica una relación inversa entre las variables es decir mientras uno aumenta el otro disminuye.

4.3.3 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

a. Prueba de normalidad

a.1 Comunidad campesina de Marcapomacocha

Hipótesis:

H0: La variable diferencia mínima por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia mínima por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_MIN
W = 0.96884, p-value = 3.933e-09
```

Hipótesis:

H0: La variable diferencia máxima por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia máxima por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_MAX
W = 0.97091, p-value = 1.037e-08
```

Hipótesis:

H0: La variable diferencia promedio por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia promedio por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_AVG
W = 0.96934, p-value = 4.952e-09
```

Hipótesis:

H0: La variable diferencia mediana por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia mediana por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_MED
W = 0.96928, p-value = 4.822e-09
```

En todas las pruebas de normalidad realizadas para los estadísticos de la mínima, máxima, media y mediana de la diferencia TB3 – TB4, a un nivel de significancia del 0.05, se rechaza la hipótesis nula debido a que el p-valor, en todos los casos, es mucho menor al nivel de significancia, lo cual significa que los resultados extremos como los observados son improbables si la hipótesis nula es cierta.

a.2 Comunidad campesina de Huayao

Hipótesis:

H0: La variable diferencia mínima por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia mínima por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_MIN
W = 0.92412, p-value = 1.066e-05
```

Hipótesis:

H0: La variable diferencia máxima por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia máxima por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_MAX
W = 0.9267, p-value = 1.501e-05
```

Hipótesis:

H0: La variable diferencia promedio por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia promedio por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_AVG
W = 0.92548, p-value = 1.276e-05
```

Hipótesis:

H0: La variable diferencia mediana por nube tiene distribución normal

H1: La variable diferencia mediana por nube no tiene distribución normal

```
Shapiro-wilk normality test
data:  datos2$DIF_MED
W = 0.92576, p-value = 1.323e-05
```

En todas las pruebas de normalidad realizadas para los estadísticos de la mínima, máxima, media y mediana de la diferencia TB3 – TB4, a un nivel de significancia del 0.05, se rechaza la hipótesis nula debido a que el p-valor, en todos los casos, es mucho menor al nivel de significancia, lo cual significa que los resultados extremos como los observados son improbables si la hipótesis nula es cierta.

b. Pruebas para verificar dependencia entre el tiempo y el número de descargas

b.1 Comunidad campesina de Marcapomacocha

Hipótesis:

H0: El número de descargas por nube depende de las horas.

H1: El número de descargas por nube no depende de las horas

```
Pearson's Chi-squared test
data:  datos2$DESCARGAS and hour(datos2$FECHA)
X-squared = 73.856, df = 171, p-value = 1
```

Hipótesis:

H0: El número de descargas por nube depende de los días.

H1: El número de descargas por nube no depende de los días.

```
Pearson's Chi-squared test
data:  datos2$DESCARGAS and day(datos2$FECHA)
X-squared = 205.5, df = 261, p-value = 0.9953
```

Hipótesis:

H0: El número de descargas por nube depende de los meses.

H1: El número de descargas por nube no depende de los mese

```
Pearson's Chi-squared test
data:  datos2$DESCARGAS and year(datos2$FECHA)
X-squared = 19.534, df = 18, p-value = 0.3597
```

4.3.4 MODELO DE PREDICCIÓN

a. Comunidad campesina de Marcapomacocha

El modelo de predicción es el ajuste del modelo de regresión lineal con la data para predecir el número de descargas promedio por caso (nube) y por hora. Cabe resaltar que este modelo es el resultado de haber trabajado con la totalidad de la data.

Se evaluó la significancia de todas las variables predictoras y se determinó que el mínimo promedio, el máximo promedio y la media promedio, explican el comportamiento del número promedio de descargas por nube en una hora, obteniéndose el siguiente modelo:

$$Y = 1.2247 - 0.4787 * X1 + 1.5297 * X2 - 1.0593 * X3 \quad (7)$$

Donde:

Y: Número de descargas promedio de un caso (nube) por hora.

X1: Diferencia mínima promedio por hora entre TB3 y TB4 por caso (nube).

X2: Diferencia máxima promedio por hora entre TB3 y TB4 por caso (nube).

X3: Diferencia media promedio por hora entre TB3 y TB4 por caso (nube).

```
Call:
lm(formula = datos3$DESCARGAS_AVG ~ datos3$DIF_MIN + datos3$DIF_MAX +
  datos3$DIF_AVG)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.4804 -0.1694 -0.1066 -0.0291  5.4088

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   1.22473    0.07332   16.705 < 2e-16 ***
datos3$DIF_MIN -0.47871    0.16846   -2.842  0.00475 **
datos3$DIF_MAX  1.52977    0.18874    8.105 8.62e-15 ***
datos3$DIF_AVG -1.05932    0.34560   -3.065  0.00234 **
---
Signif. codes:
  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6231 on 355 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.587,    Adjusted R-squared:  0.5836
F-statistic: 168.2 on 3 and 355 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 29. Cálculo del R-squared para la comunidad campesina de Marcapomacocha

Según el valor del r-squared que se muestra en la salida de RStudio, el modelo planteado explica más del 58.7% de los datos. Del cuadro, notar que los resultados del p-valor de la

última columna son menores al nivel de significancia 0.05, lo cual estaría indicando que las variables "TB3-TB4 mínima/hora", "TB3-TB4 máxima/hora" y "TB3-TB4 promedio/hora", son las más significativas para explicar el modelo de predicción del número de descargas promedio por hora, para la zona de Marcapomacocha.

b. Comunidad campesina de Huayao

Se ajustó el modelo de regresión lineal con la data para predecir el número de descargas promedio por caso (nube) y por hora. Cabe resaltar que este modelo es resultado de haber trabajado solo con el año 2016 por ser el año en que el registro estaba más continuo que el de los otros años. Se evaluó la significancia de todas las variables predictoras y se determinó que el mínimo promedio, el máximo promedio y la media promedio, explican el comportamiento del número promedio de descargas por nube en una hora, obteniéndose el siguiente modelo de predicción de descargas eléctricas atmosféricas:

$$Y = 1.2008 + 4.3988*X1 + 7.5915*X2 - 11.9987*X3 \quad (8)$$

Donde:

Y: Número de descargas promedio de un caso (nube) por hora.

X1: Diferencia mínima promedio por hora entre TB3 y TB4 por caso (nube).

X2: Diferencia máxima promedio por hora entre TB3 y TB4 por caso (nube).

X3: Diferencia media promedio por hora entre TB3 y TB4 por caso (nube).

```
Call:
lm(formula = datos3$DESCARGAS_AVG ~ datos3$DIF_MIN + datos3$DIF_MAX +
  datos3$DIF_AVG)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.62215 -0.16917 -0.09272 -0.00630  1.84632

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    1.2008     0.1126  10.663 6.69e-14 ***
datos3$DIF_MIN  4.3988     0.6025   7.301 3.65e-09 ***
datos3$DIF_MAX  7.5915     0.6091  12.464 3.40e-16 ***
datos3$DIF_AVG -11.9987     1.1779 -10.187 2.90e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4195 on 45 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8439,    Adjusted R-squared:  0.8335
F-statistic: 81.12 on 3 and 45 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 30. Cálculo del R-squared para la comunidad campesina de Huayao

Según el valor del r-squared que se muestra en la salida de RStudio, el modelo planteado explica más del 84.3% de los datos. Del cuadro, notar que los resultados del p-valor de la última columna son menores al nivel de significancia 0.05, lo cual estaría indicando que las variables "TB3-TB4 mínima/hora", "TB-TB4 máxima/hora" y "TB3-TB4 promedio/hora", son las más significativas para explicar el modelo de predicción del número de descargas promedio por hora para Huayao.

4.4 DIAGNOSTICO DE LA OCURRENCIA DE DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS SOBRE LA CUENCA DEL RIO MANTARO

4.4.1 Pronóstico de Nowcasting

Durante las simulaciones en la implementación del SAT, los pronosticadores de nowcasting del servicio meteorológico que estuvieron de turno durante la ocurrencia de los eventos extremos fueron quienes se encargaron de hacer seguimiento a los sistemas nubosos con altas probabilidades de generar descargas eléctricas, para tal efecto hicieron uso de imágenes de satélite en las bandas respectivas, salidas de modelos numéricos para verificar las condiciones previstas en las diferentes estratos de la atmosfera así como otras herramientas tecnológicas que contribuyan a la vigilancia de las condiciones del evento extremo en estudio. Para la comunidad campesina de Marcapomacocha se observó la evolución de los sistemas nubosos que se aproximan a dicha comunidad tal como aquel que se presentó el día 8 de marzo desde sectores norte y este (figura 31) y que precisamente se desplazaban hacia la comunidad con características definidas tales como la disminución brusca de la temperatura de brillo en la banda 14 del GOES 16 (figura 32) donde podemos apreciar que la temperatura de brillo para el punto de latitud: 11.2608° Sur y longitud: 76.2748° Oeste (ubicado dentro de los 10 km de radio de la comunidad campesina) de dicha banda disminuye aproximadamente desde -2°C a las 20:15 Z hasta -63°C a las 22:15 Z significando el incremento de la extensión vertical de la nube que ingresó desde el este lo que indica características favorables para ocurrencia de lluvias y descargas eléctricas. De manera similar en las inmediaciones de la comunidad campesina de Huayao se observó la evolución de los sistemas nubosos que se aproximan a dicha comunidad tal como aquel que se presentó el día 9 de marzo desde sectores este (figura 34) y que precisamente se desplazaban hacia la comunidad con características definidas tales como la disminución brusca de la temperatura

de brillo en la banda 14 del GOES 16 (figura 33) donde podemos apreciar que la temperatura de brillo para el punto de latitud: 12.0475° Sur y longitud: 75.2556° Oeste (ubicado dentro de los 10 km de radio de la comunidad campesina) de dicha banda disminuye aproximadamente desde 15°C a las 19:30 Z hasta -33°C a las 21:00 Z significando el incremento de la extensión vertical de la nube que ingresó desde el este lo que indica características favorables para ocurrencia de lluvias y descargas eléctricas.

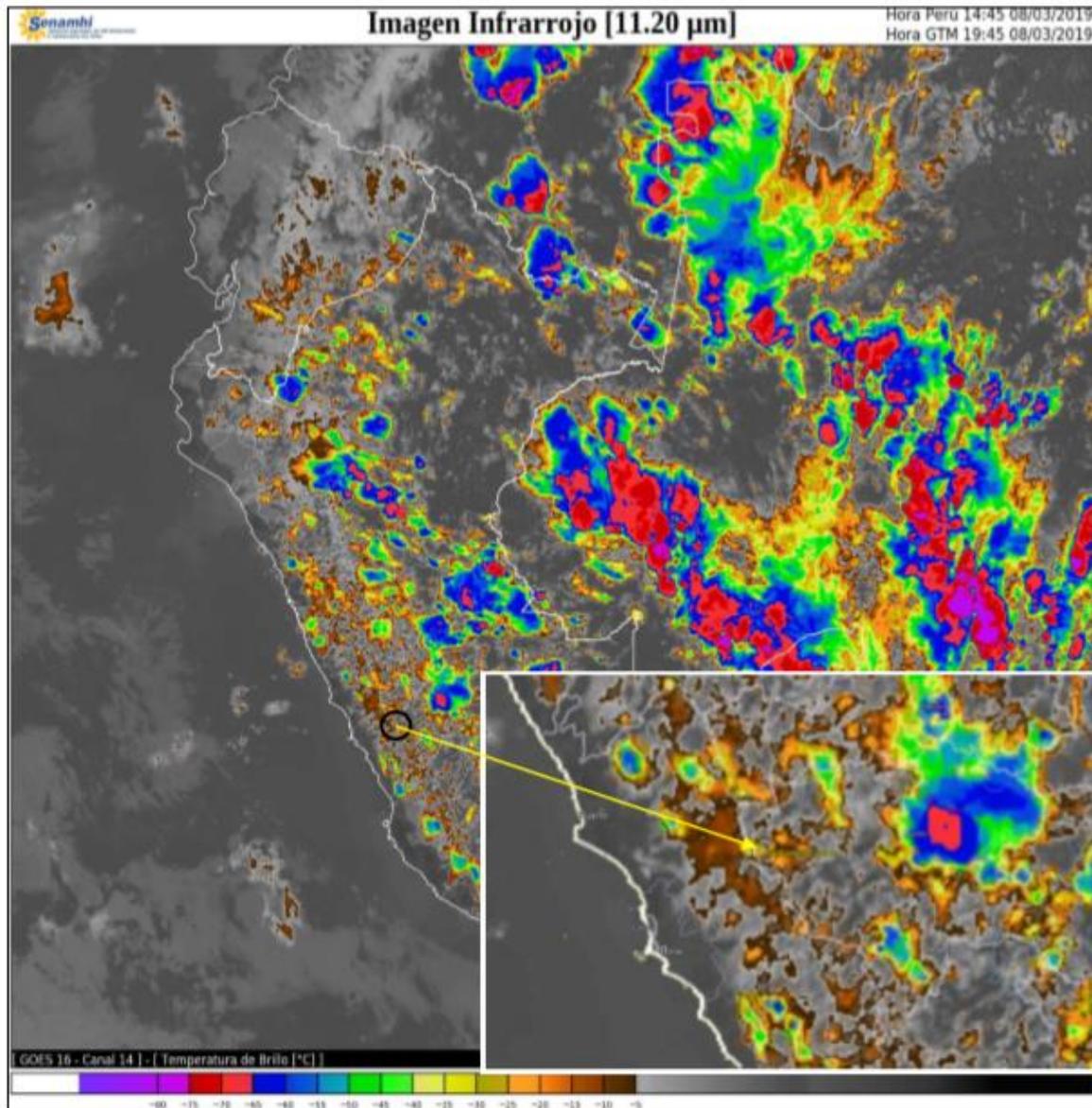


Figura N° 31. Imagen de Satélite del GOES 16 Banda 14 para las 19:45 UTC del 8 de marzo del 2019

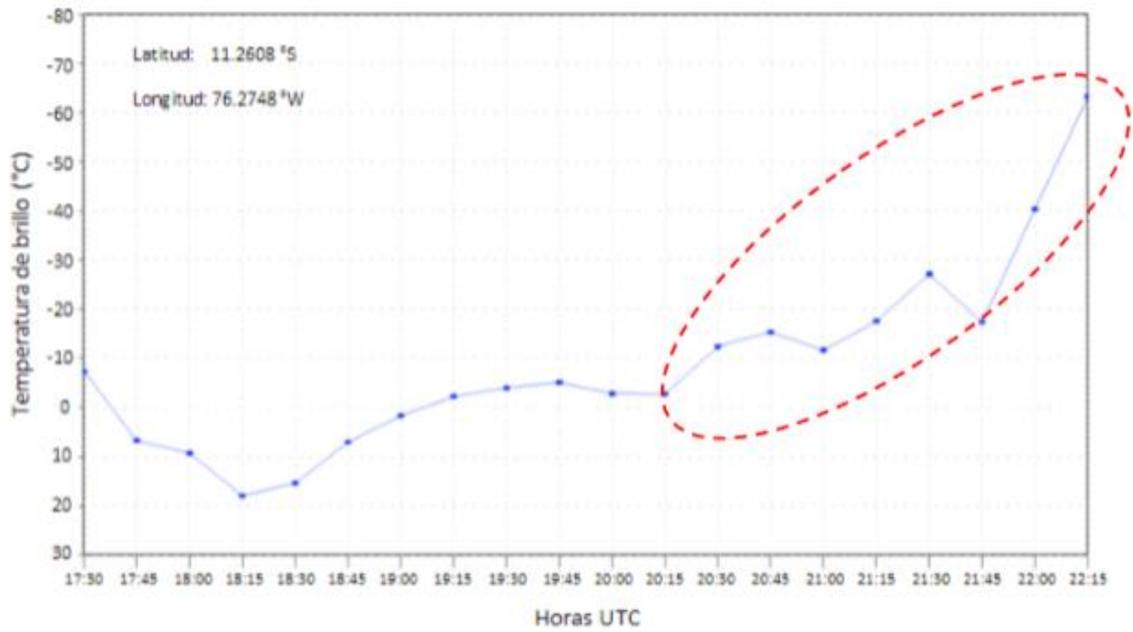


Figura 32. Punto grama para verificación de Temperatura de Brillo de la banda 14 del GOES 16 para la zona de Marcapomacocha (08 de marzo de 2019)

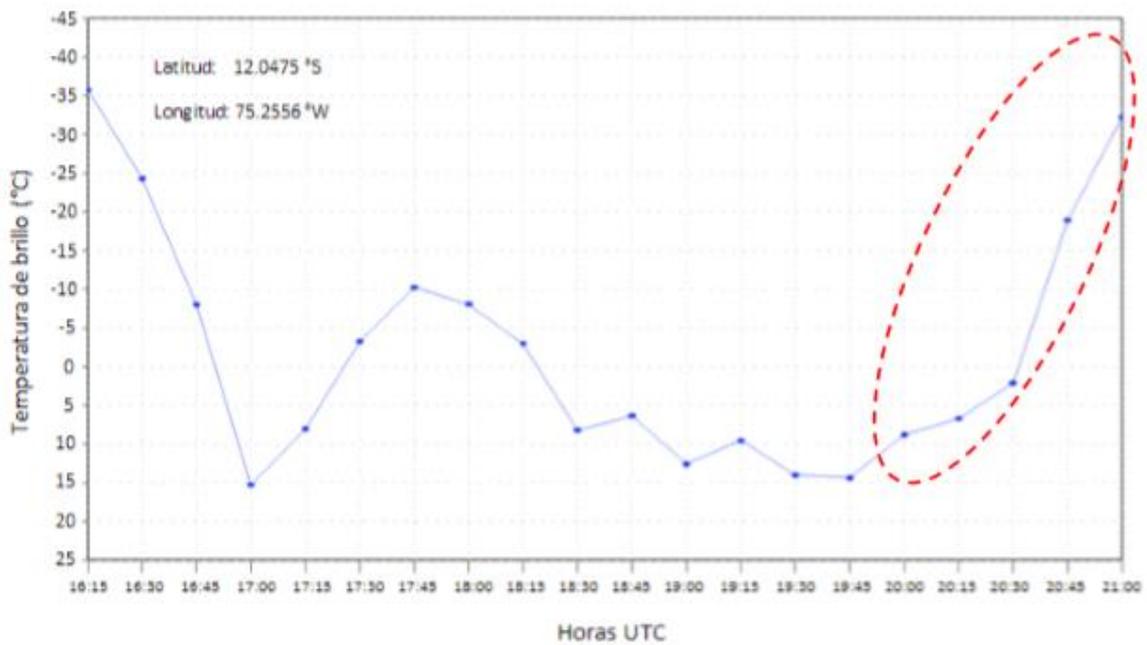


Figura 33. Punto grama para verificación de Temperatura de Brillo de la banda 14 del GOES 16 para la zona de Huayao (09 de marzo de 2019)

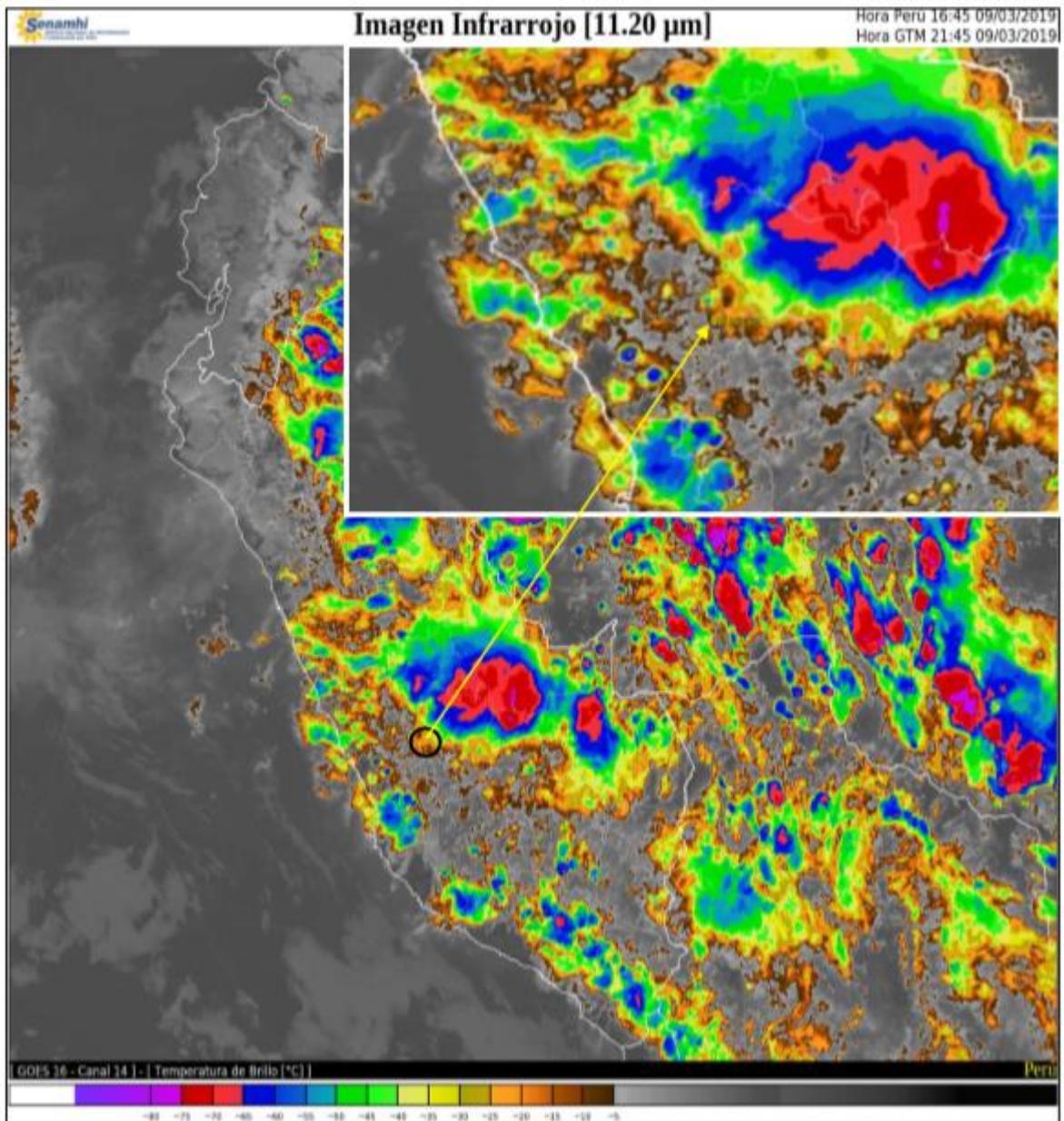


Figura N° 34. Imagen de Satélite del GOES 16 Banda 14 para las 21:45 UTC del 9 de marzo del 2019

4.4.2 CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE SUPERFICIE Y ALTURA

a. Condiciones de superficie

Para la localidad de Marcapomacocha se tiene una variación de la presión atmosférica (fig. 35 a) con dos valores máximos y dos valores mínimos, resaltando los valores más bajos que se suceden entre las 15:00 y 18:00 horas y que coinciden con los mayores incrementos de nubes convectivas generadoras de lluvias y rayos; respecto de la temperatura del aire (fig. 35 b) observamos que se tiene un máximo valor a las 15:00 horas luego del cual disminuye rápidamente que está asociado con el posicionamiento de nubosidades convectivas que dan lugar a lluvias; en relación a la humedad relativa se observan los valores más bajos entre las 10:00 y 15:00 horas mientras que la radiación solar (fig. 35 e) muestra el máximo valor a las 14:00 horas luego del cual disminuye rápidamente asociándose con el posicionamiento de nubosidades convectivas que impiden el paso de rayos solares incidiendo en la disminución de esta variable meteorológica; en cuanto a la precipitación (fig. 35 d) observamos que a partir de las 13:00 horas se suceden eventos lluviosos cada vez más intensos que se pueden asociar a ingresos continuos de nubosidades densas y que se posicionan sobre la localidad en estudio; en relación a la dirección y velocidad del viento observamos en la rosa de viento (fig. 35 f) que existe una predominancia desde el este y sur oeste con otras componentes desde el noroeste, situación que se asocia con el ingreso de nubosidades desde estas orientaciones.

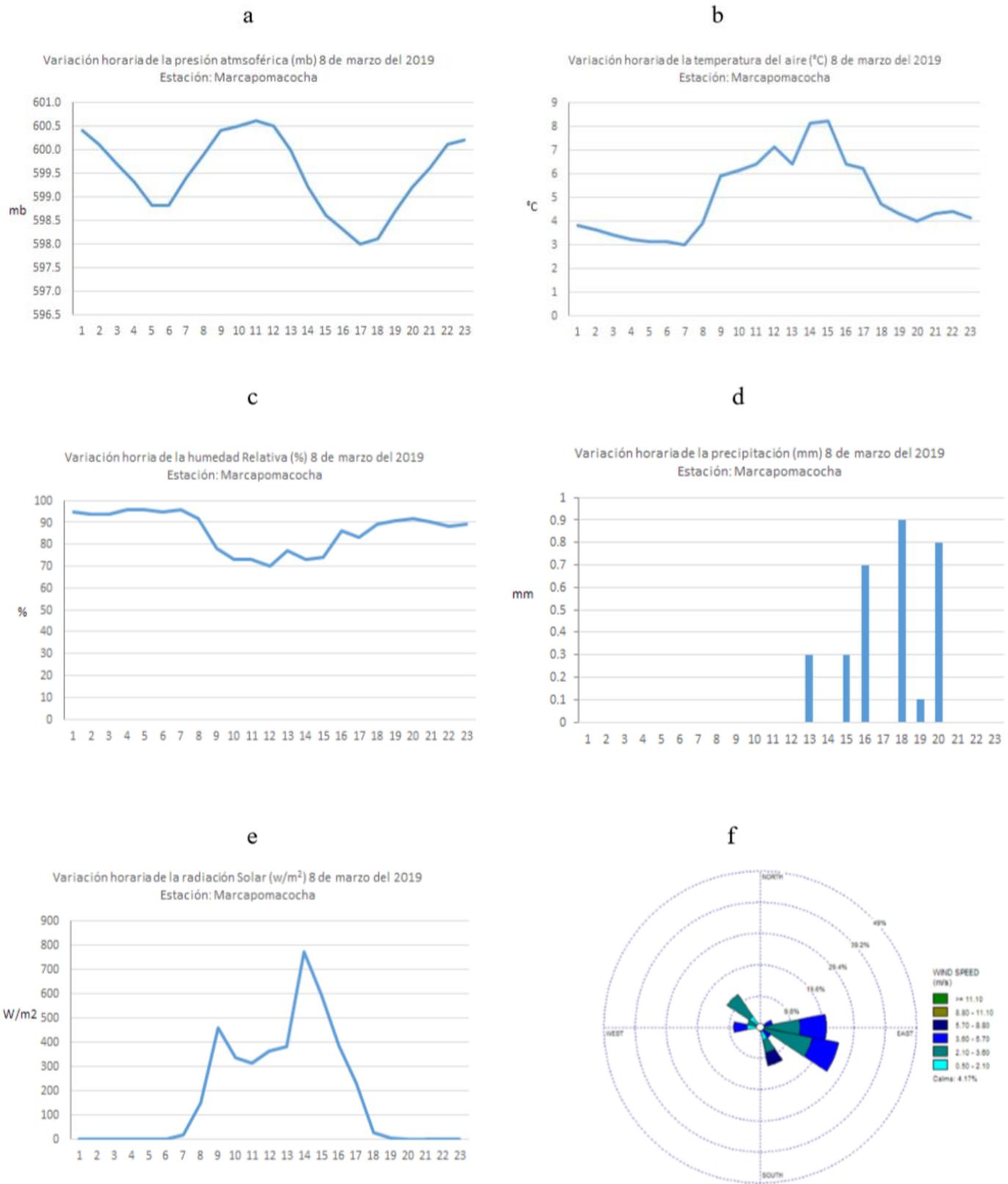


Figura 35. Estación meteorológica de Marcapomacocha (08 de marzo de 2019)

b. Condiciones meteorológicas de altura

Mediante las figuras 36, 37, 38 y 39 se explican las condiciones atmosféricas que dieron origen a los eventos en estudio. Para el día 8 de marzo podemos observar que a nivel de 600 mb. Los flujos de vientos están predominando sobre casi todo el territorio del Perú desde el este y noreste, situación que favorece el desplazamiento de masas de aire húmedas desde las zonas orientales hacia sectores del estudio (fig. 36 a, b, c y d) como son los sectores del centro del país. En la figura 38 se aprecia que hay un incremento sustantivo de la humedad específica en 600 mb. sobre sectores centrales del país alrededor de las 12 z (fig. 38 c) que conjugado con los flujos de viento favorecen el desplazamiento de humedad hacia la zona de estudio que pudieron haber originado los eventos de lluvias y descargas eléctricas previstos en el aviso meteorológico. Para el día 9 de marzo se puede observar que los flujos de los vientos principalmente a partir de las 12 z son los que provienen desde el este y noreste (fig. 37 c) favoreciendo el transporte de humedad desde sectores orientales la cual se ve representada por la humedad específica con mayores valores a partir de las 12 Z (fig. 39 c).

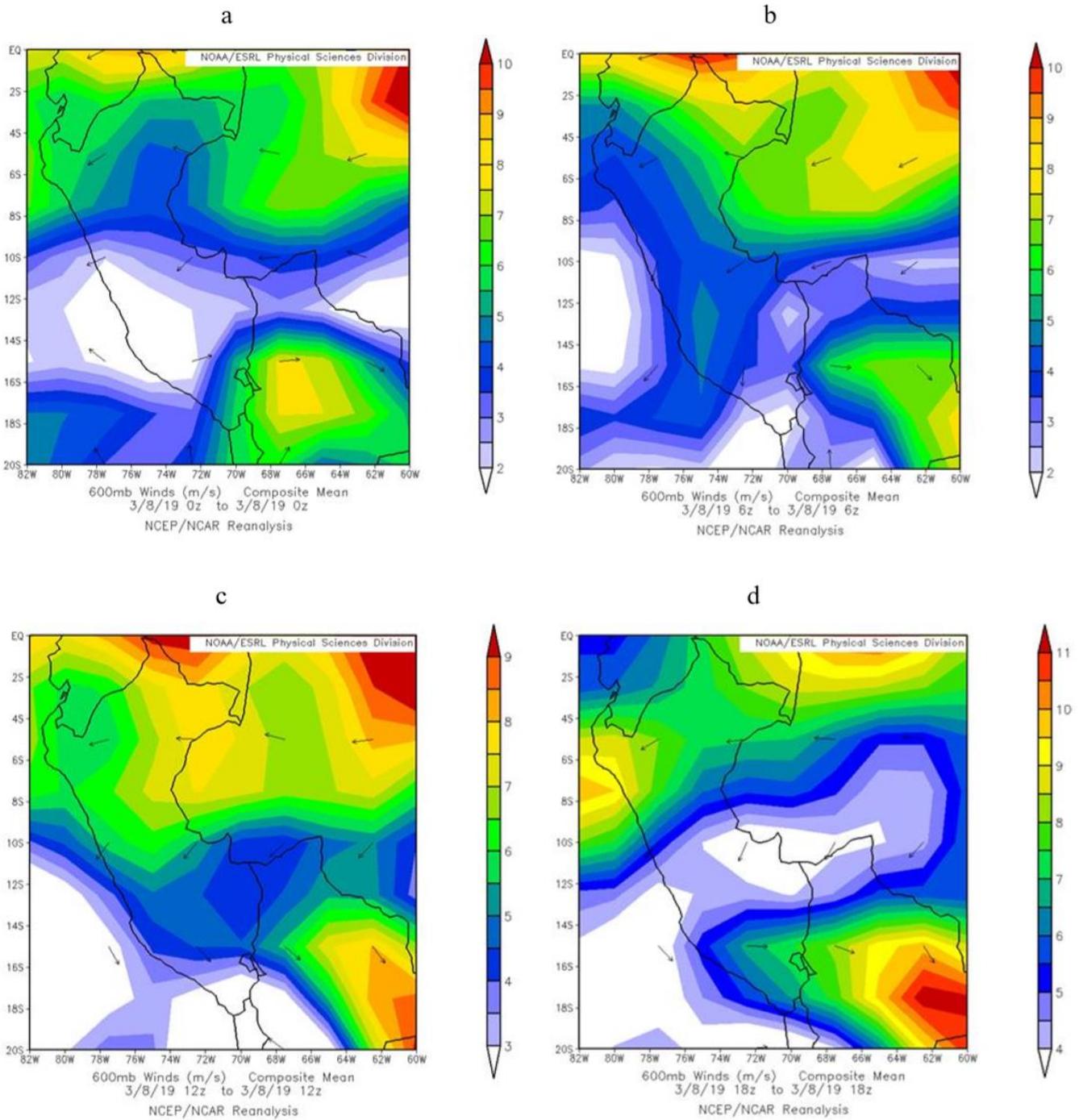


Figura 36. Flujo de viento a 600 mb. durante el 8 de marzo del 2019

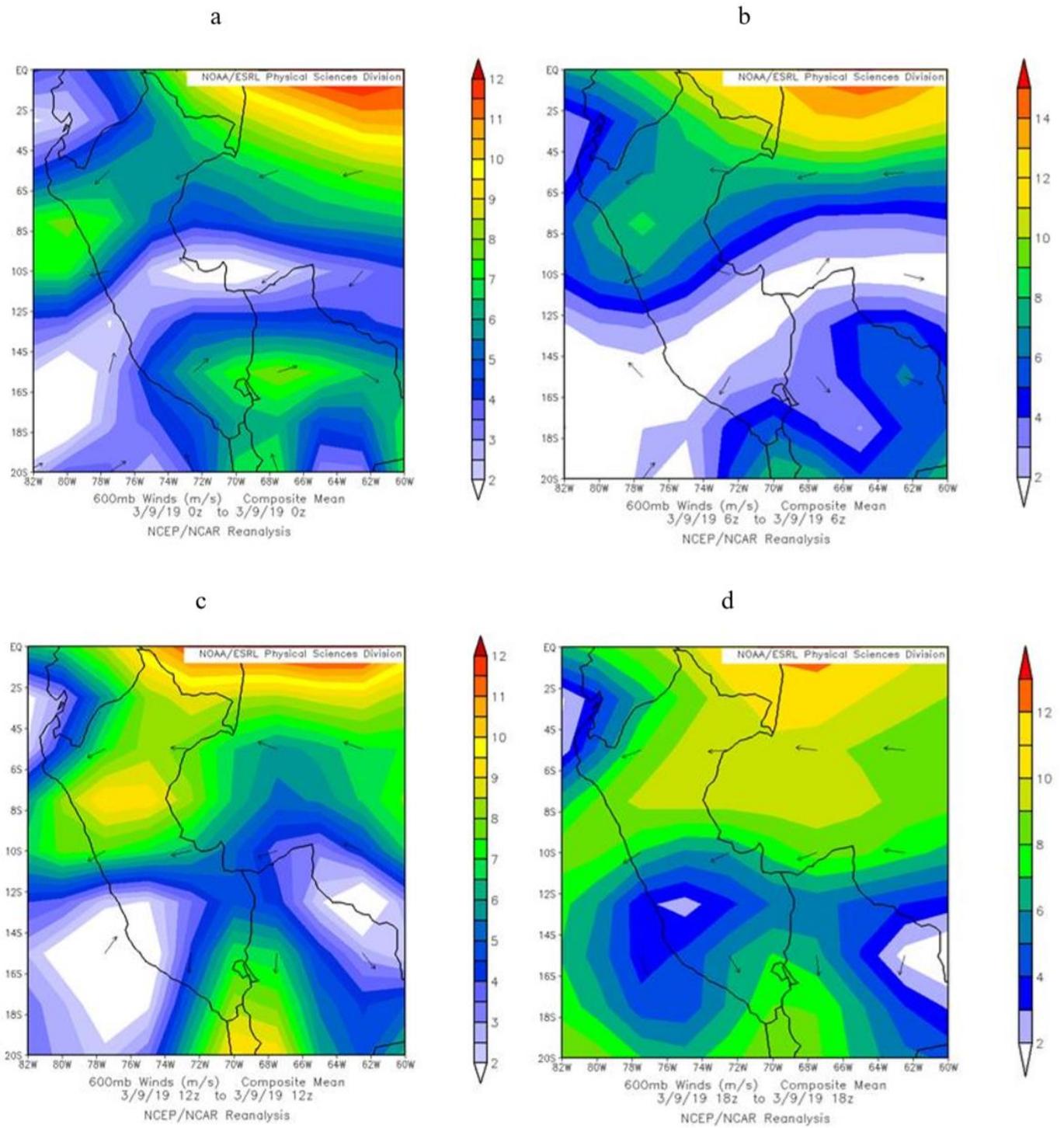


Figura 37. Flujo de viento a 600 mb. durante el 9 de marzo del 2019

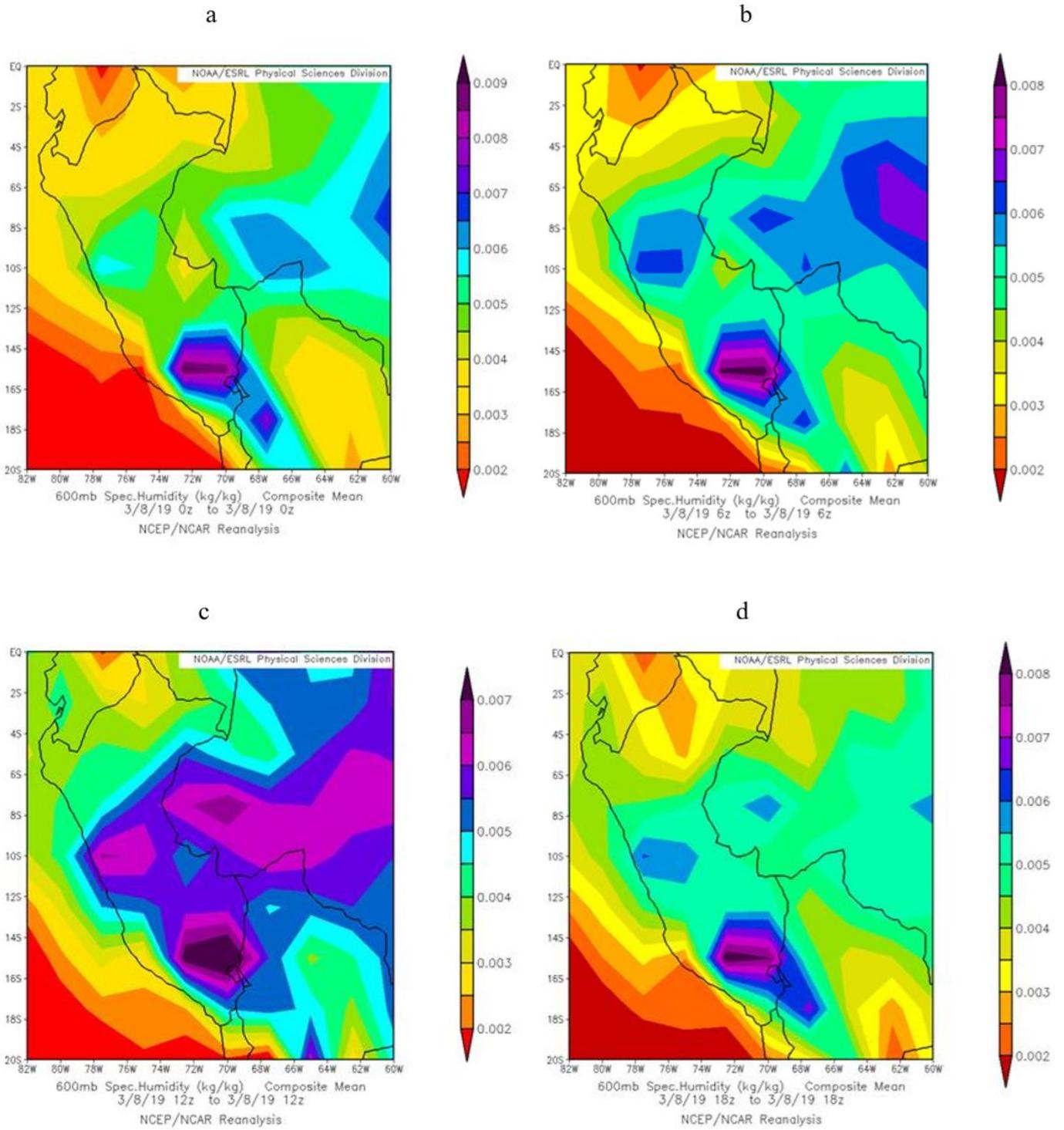


Figura 38. Humedad específica a 600 mb. durante el 8 de marzo del 2019

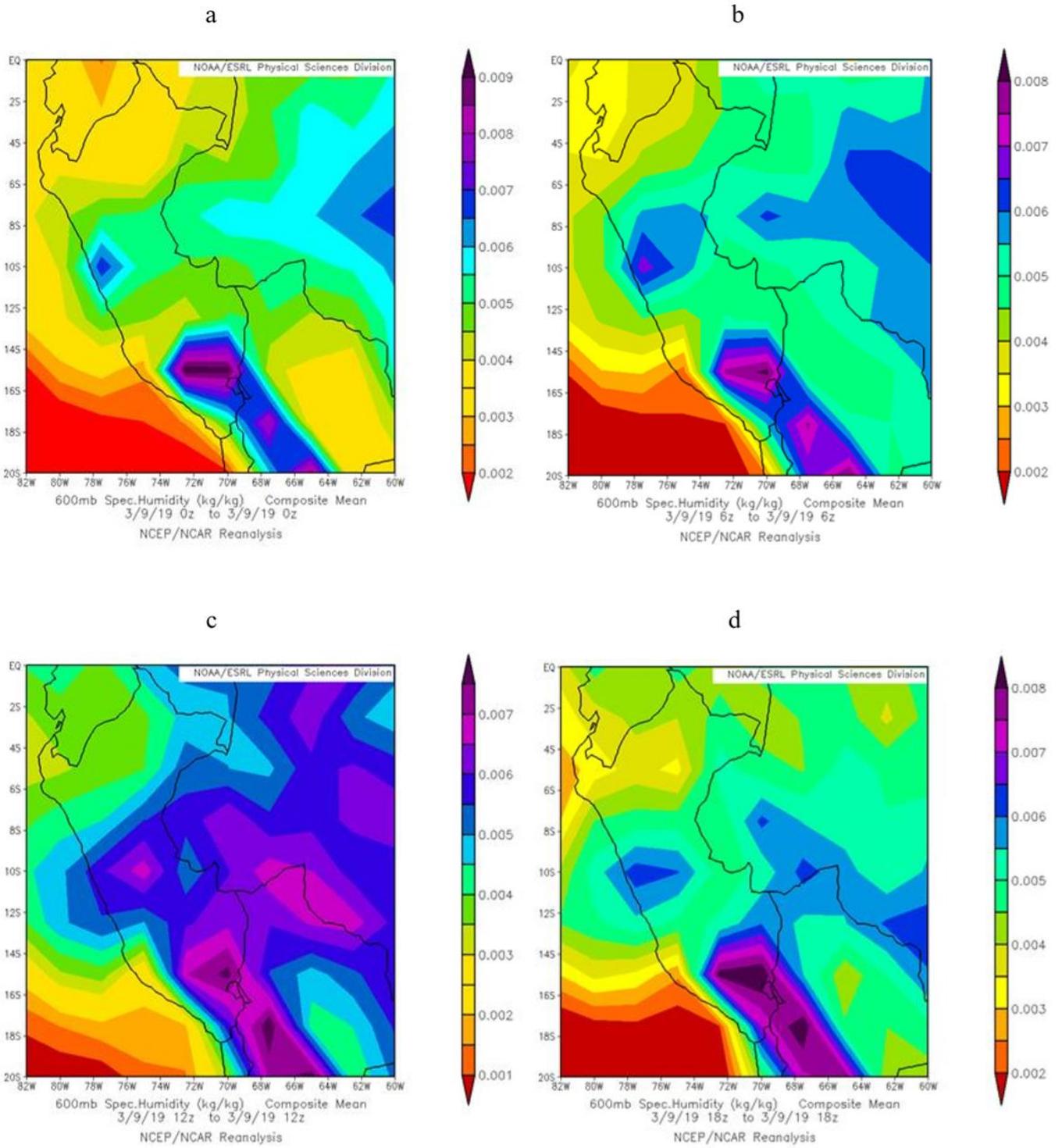


Figura 39. Humedad específica a 600 mb. durante el 9 de marzo del 2019

4.5 IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA PARA DESCARGAS ELÉCTRICAS DE ORIGEN ATMOSFÉRICO

4.5.1 SIMULACIONES DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Inicialmente se verifica la vigencia de un aviso meteorológico de nivel 3 o más emitido por el Servicio Meteorológico Nacional (Figura 40) y en las que se incluyan las localidades en estudio.

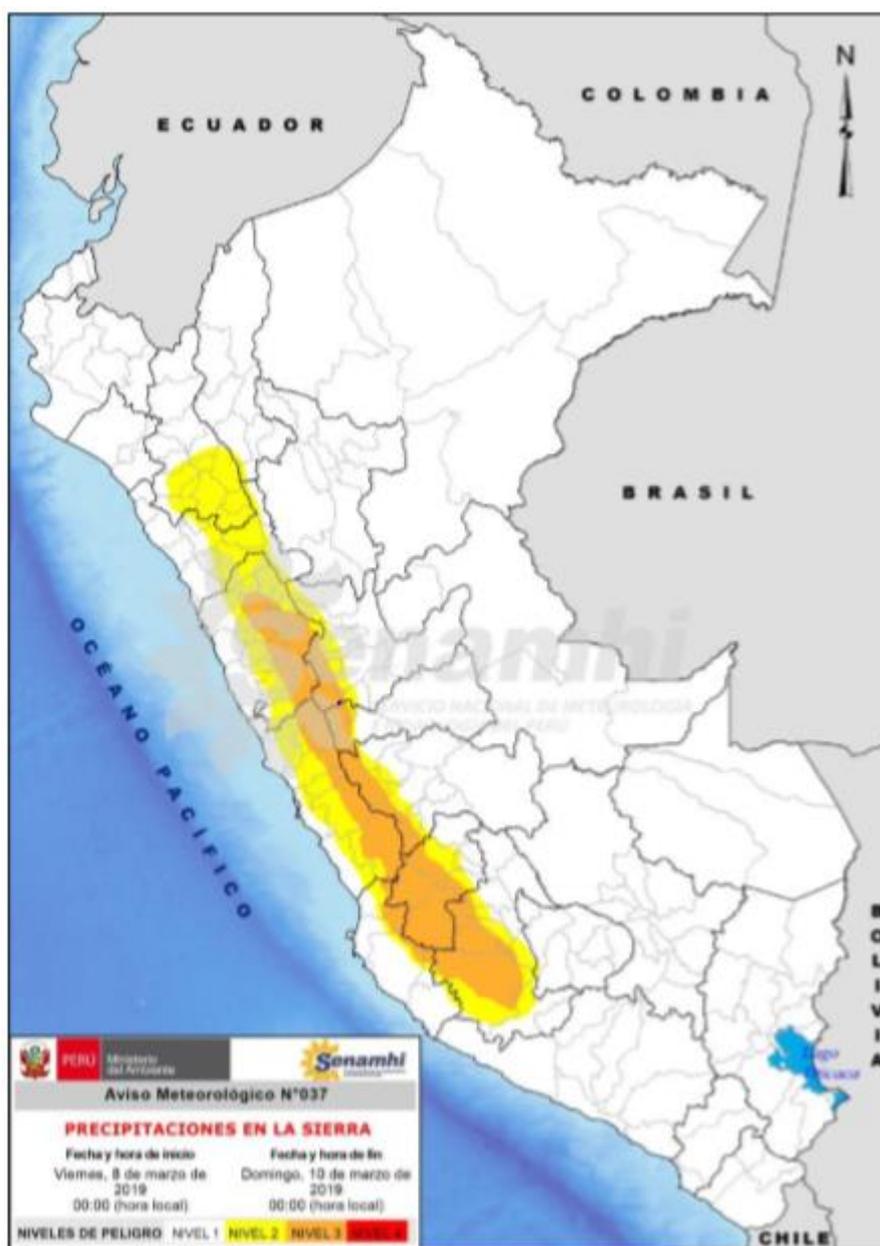


Figura 40. Aviso meteorológico vigente durante simulaciones de implementación de SAT.

Confirmado la ocurrencia de eventos extremos según el aviso meteorológico, se inician las coordinaciones con los miembros del comité del SAT de cada centro poblado en las que se aplicará la simulación con la finalidad que inicien los preparativos para la misma. De manera simultánea se organiza con los pronosticadores del servicio meteorológico que estuvieron de turno durante la ocurrencia de los eventos y realización de las simulaciones, quienes se encargaron de dar aviso al observador respectivo de cada centro poblado a la vez de vigilar el comportamiento de las variables atmosféricas durante la ocurrencia del evento e informar continuamente de la evolución del mismo.

Ante las proximidades del evento, durante las simulaciones, la primera comunicación la proporciona el meteorólogo de turno a través de una llamada celular/RPM hacia el observador meteorólogo de la comunidad quien a su vez verifica in situ de la aproximación de algún sistema nuboso con probabilidades de generar lluvias y rayos; confirmado el evento, el observador meteorólogo da aviso a las autoridades de la comunidad que conforman el comité del SAT por vía teléfono celular/RPM y estos a su vez activan el dispositivo sonoro/visual característico que identifique la aproximación de eventos extremos.

La población en la comunidad campesina o en campo identifica la manifestación del dispositivo sonoro/visual y actúa de acuerdo a las recomendaciones ante estos fenómenos extremo, manteniéndose atento a la evolución y disipación o término de la alarma.

Finalizado el evento los brigadistas realizan un recuento de los posibles daños ocasionados y reportan a las autoridades inmediatas superiores.

a. Comunidad campesina de Marcapomacocha (viernes 8 de marzo de 2019)

La simulación de aplicación del SAT se realizó durante las celebraciones por el día internacional de la mujer, en las que se sucedieron una serie de actividades al aire libre en las inmediaciones de la plaza de armas de la comunidad, para tal fin se congregaron gran cantidad de personas entre pobladores y autoridades.

Simultáneamente el meteorólogo de turno se encontraba en las instalaciones de la sede central del SENAMHI realizando la vigilancia de las condiciones atmosféricas para la zona

de estudio, teniendo como principales herramientas a las imágenes de satélite y al intersat para generación de productos del nowcasting, quien va verificando la evolución de los sistemas nubosos que se aproximan a la comunidad tal como aquel que se presentó desde sectores este (figura 31) y que precisamente se desplazaban hacia la comunidad con características definidas tales como la disminución rápida de la temperatura de brillo en la banda 14 del GOES 16 (figura 32); ante las condiciones favorables para generación de descargas eléctricas atmosféricas, realiza una llamada al observador de la comunidad, proporcionando la descripción básica del cuadrante de localización del sistema nuboso, rumbo del mismo y la probable evolución; la observadora, una vez recibida la información, verifica de manera visual, según la información proporcionada por el meteorólogo de turno, de la presencia o no del sistema nuboso mencionado; comprobado el evento, da aviso a los miembros del comité de SAT de la comunidad quienes a su vez activan el medio sonoro/visual que para este efecto son los “campanazos” de la iglesia del pueblo. La población al detectar la manifestación del dispositivo sonoro/visual pone en práctica todo lo recibido a través de los talleres y de manera ordenada se resguardan ante el inminente evento atmosférico peligroso, priorizando a las personas más vulnerables como son los niños, ancianos y mujeres. El evento tuvo una duración aproximada de 20 minutos luego del cual todas las actividades vuelven a la normalidad.

Finalmente se elabora un acta que comprende una descripción de todas las actividades realizadas, posibles daños u otras eventualidades relacionadas (Anexo 10).

b. Comunidad Campesina de Huayao (sábado 9 de marzo de 2019)

La simulación de aplicación del SAT se realizó durante las actividades normales de la comunidad; en las que se sucedieron una serie de actividades al aire libre tanto en los campos de cultivo como en las inmediaciones de la plaza de armas de la comunidad.

Simultáneamente el meteorólogo de turno se encontraba en las instalaciones de la sede central del SENAMHI realizando la vigilancia de las condiciones atmosféricas para la zona de estudio, teniendo como principales herramientas a las imágenes de satélite y al intersat para generación de productos del nowcasting, quien va verificando la evolución de los sistemas nubosos que se aproximan a la comunidad (figura 34) y también vigilando mediante

los puntogramas la evolución de la temperatura de brillo en diferentes puntos de las zonas de interés (figura 33); ante las condiciones favorables para generación de descargas eléctricas atmosféricas, realiza una llamada al observador de la comunidad, proporcionando la descripción básica del cuadrante de localización del sistema nuboso, rumbo del mismo y la probable evolución; la observadora, una vez recibida la información, comprobado el evento, da aviso a los miembros del comité de SAT de la comunidad quienes a su vez activan el medio sonoro/visual que para este efecto son las “sirenas” de un vehículo de la comunidad. La población al detectar la manifestación del dispositivo sonoro/visual pone en práctica todo lo recibido a través de los talleres y de manera ordenada se resguardan ante el inminente evento atmosférico peligroso, priorizando a las personas más vulnerables como son los niños, ancianos y mujeres. El evento tuvo una duración aproximada de 20 minutos luego del cual todas las actividades vuelven a la normalidad. Finalmente se elabora un acta que comprende una breve descripción de todas las actividades realizadas (Anexo 11).

4.5.2 Comprobación de la utilización de diferencias de temperatura de brillo en los modelos de pronósticos y cálculo de probabilidades de ocurrencia de rayos.

a. Comprobación utilizando Banda 3 y banda 4 del GOES 13 en comunidad campesina de marcapomacocha

El modelo multinomial utilizado, calcula las probabilidades de pertenecer a cierta categoría. Las categorías para este caso son los números de descargas, es decir para 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 y 12 rayos. La probabilidad de que el número de descargas sea igual a 1 se calcula por complemento conociendo que la suma de las probabilidades debe sumar 1 y teniendo en consideración que las probabilidades de que ocurran más de 12 descargas resultan no significativas. Las variables predictoras o explicativas que determinan estas probabilidades son DIF_MAX, DIF_MIN y DIF_PROM. a continuación, las relaciones de probabilidades obtenidas utilizando el software Rstudio:

```

p2=exp (-2.695378+45.60089xDIF_MAX-10.119454xDIF_MIN -35.49872xDIF_MIN)
p3=exp ( -4.676819+46.09306xDIF_MAX-10.116879xDIF_MIN-35.94434xDIF_MIN)
p4=exp (-5.702848+ 45.34011xDIF_MAX-7.661811xDIF_MIN-37.74739xDIF_MIN)
p5=exp (-6.179022+ 45.01235xDIF_MAX-7.281029xDIF_MIN-37.75950xDIF_MIN)
p6=exp (-4.462684+ 51.15088xDIF_MAX-20.232697xDIF_MIN-31.39421xDIF_MIN)
p8=exp (-68.108634+ 38.24997xDIF_MAX+ 24.454502xDIF_MIN-62.15459xDIF_MIN)
p10=exp (-6.663454+ 48.78311xDIF_MAX-15.341383xDIF_MIN-33.57389xDIF_MIN)
p12=exp (-9.209595 +52.62275xDIF_MAX-23.412237xDIF_MIN-29.26101xDIF_MIN)
p1=1-(p2+p3+p4+p5+p6+p8+p10+p12)

```

Para el cálculo de la tasa de aciertos, se separó aleatoriamente datos2 en dos conjuntos, los datos de 2015-2016 para entrenar el modelo (llamada “train”) y los datos del 2017 para hallar su tasa de aciertos (llamada “test”), utilizando el software Rstudio:

```

> ##### validación con los datos del año 2017 #####
> pred=predict(mod1,test,type="class")
>
>
> ##### TASA DE ACIERTO #####
> sum(diag(as.matrix(table(test$DESCARGAS,pred))[1:8,1:8]))/sum(as.matrix(table(test$DESCARGAS,pred)[1:8,1:8]))
[1] 0.8790323

```

b. Comprobación utilizando Banda 3 y banda 4 del GOES 13 en comunidad campesina de Huayao

El modelo multinomial utilizado, calcula las probabilidades de pertenecer a cierta categoría. Las categorías para este caso son los números de descargas, es decir para 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 9 rayos. La probabilidad de que el número de descargas sea igual a 1 se calcula por complemento conociendo que la suma de las probabilidades debe sumar 1 y teniendo en consideración que las probabilidades de que ocurran más de 9 descargas resultan no significativas. Las variables predictoras o explicativas que determinan estas probabilidades

son DIF_MAX, DIF_MIN y DIF_PROM. a continuación, las relaciones de probabilidades obtenidas utilizando el software Rstudio:

```
p2=exp (-2.857039+187.17230xDIF_MAX+20.06728xDIF_MIN-207.2943xDIF_PROM)
p3=exp (-3.286523+168.36184xDIF_MAX +53.72654xDIF_MIN -222.1137xDIF_PROM)
p5=exp (-8.773363+68.01485xDIF_MAX +218.78063xDIF_MIN -286.9024xDIF_PROM)
p6=exp (-15.661054+263.0033xDIF_MAX -141.74559xDIF_MIN -121.1867xDIF_PROM)
p9=exp (-106.466716+322.0026xDIF_MAX -149.14896xDIF_MIN -172.0609xDIF_PROM)
p1=1-(p2+p3+p5+p6+p9)
```

Para el cálculo de la tasa de aciertos, se separa aleatoriamente datos2 en dos conjuntos, los datos de 2016 para entrenar el modelo (llamada “train”) y los datos del 2015 y 2017 para hallar su tasa de aciertos (llamada “test”).

```
> ##### validación con los datos del año 2017 #####
> pred=predict(mod1,test,type="class")
>
>
> #### TASA DE ACIERTO ####
> sum(diag(as.matrix(table(test$DESCARGAS,pred))[1:3,1:3]))/sum(as.matrix(table(test$DESCARGAS,pred)[1:3,1:3]))
[1] 1
```

c. Comprobación utilizando Banda 9 y banda 14 del GOES 16

Las comprobaciones se llevaron a cabo utilizando los archivos NetCDF diarios de la banda 9 y banda 14 del GOES 16 que son equivalentes a la banda 3 y banda 4 del GOES 13 respectivamente, de estos se extrajeron los valores de temperatura de brillo de ambas bandas para el periodo de tiempo de las simulaciones y localizaciones dentro de un radio de 10 km alrededor de cada comunidad campesina en estudio.

Se aplicaron los algoritmos respectivos (Anexo 3) y se puede observar en los cuadros 14 y 15 los resultados obtenidos.

c.1. Comunidad campesina de Marcapomacocha

En el cuadro 15 se observa una tabla de doble entrada con número de descargas como primera columna (vertical) y diferencia de temperatura de brillo (TB9-TB14) en la primera fila (horizontal) y los resultados de la tabla son las probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas dado un valor de diferencia de temperatura de brillo en un lapso de 20 minutos para el día 8 de marzo del 2019. Podemos apreciar que para -1, -2 y -3 °C no se cuenta con información que apoye en los cálculos de probabilidades además son varios los valores de 0.0 % lo cual indica que no se tienen condiciones para ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas bajo cierta condición de diferencia de temperatura de brillo dada; se tiene 20% de probabilidad de que con diferencia de temperatura de brillo de -4, -5 y -6 °C se puedan tener 3 rayos mientras que para temperaturas de -7, -8, -9 y -10 °C esa probabilidad se reduce a 16.67 %.

Se tiene 40% de probabilidad que con diferencia de temperatura de brillo de -4, -5 y -6 °C pueda acontecer 4 y 7 descargas; además se tiene 33.33% que con diferencia de temperatura de brillo de -7, -8, -9 y -10 °C puedan ocurrir 5 rayos sobre la comunidad campesina de Marcapomacocha.

Cuadro 15. Probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas en la comunidad campesina de Marcapomacocha

Nº de Descargas	Diferencia de temperatura de brillo (TB9-TB14) °C												
	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13
1	ND	ND	ND	0.00	0.00	0.00	16.67	16.67	16.67	16.67	14.29	14.29	14.29
2	ND	ND	ND	0.00	0.00	0.00	16.67	16.67	16.67	16.67	14.29	14.29	14.29
3	ND	ND	ND	20.00	20.00	20.00	16.67	16.67	16.67	16.67	0.00	0.00	0.00
4	ND	ND	ND	40.00	40.00	40.00	16.67	16.67	16.67	16.67	28.57	28.57	28.57
5	ND	ND	ND	0.00	0.00	0.00	33.33	33.33	33.33	33.33	14.29	14.29	14.29
6	ND	ND	ND	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	ND	ND	ND	40.00	40.00	40.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.29	14.29	14.29
8	ND	ND	ND	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	ND	ND	ND	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	ND	ND	ND	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ND: No hay datos

c.2. Comunidad campesina de Huayao

En el cuadro 16 se observa una tabla de doble entrada con número de descargas como primera columna (vertical) y diferencia de temperatura de brillo (TB9-TB14) en la primera fila (horizontal) y los resultados de la tabla son las probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas dado un valor de diferencia de temperatura de brillo en un lapso de 20 minutos para el día 9 de marzo del 2019. Podemos apreciar que para -1 a -3 °C no se cuenta con información que apoye en los cálculos de probabilidades además son varios los valores de 0.0 % lo cual indica que no se tienen condiciones para ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas bajo cierta condición de diferencia de temperatura de brillo dada sin embargo se tiene 100% de probabilidad de que con diferencia de temperatura de brillo de -4, -5 o -6 °C se tengan 2 rayos; también se tienen probabilidades de 33.33 % que con diferencia de temperatura de brillo de -7, -8, -9 o -10 °C se tengan 8 o 10 rayos sobre la comunidad campesina.

Podemos apreciar que las probabilidades de tener 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 descargas son 0% cuando se tienen diferencias de temperatura de brillo de -4 hasta -10 °C luego con menores valores de temperatura esas probabilidades incrementan (5.88, 11.76, 17.65 y 23.53 % respectivamente).

Cuadro 16. Probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas en comunidad campesina de Huayao

N° de Descargas	Diferencia de temperatura de brillo (TB9-TB14) °C												
	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13
1	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.88	5.88	5.88
2	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.76	11.76	11.76
5	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.65	17.65	17.65
7	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.53	23.53	23.53
8	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	33.33	33.33	33.33	33.33	17.65	17.65	17.65
9	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	NA	NA	NA	0.00	0.00	0.00	33.33	33.33	33.33	33.33	5.88	5.88	5.88

ND: No hay datos

4.5.3 Evolución de la diferencia de temperatura de brillo (TB9-TB14) en estaciones de cuenca del Río Mantaro durante simulaciones

a. Estación Yauli

Para el día 8 de marzo a las 22:30 Z (Anexo 1.1 a) se presentaron mayores fluctuaciones en las diferencia de temperatura de brillo disminuyendo estas fluctuaciones entre las 22:45 Z a 23:00 Z (Anexo 1.1 c y e respectivamente) indicando esta situación que las nubosidades que se posicionaron sobre esta estación se mantuvieron estables con valores menores a 5°C; similarmente al día anterior el día 9 de marzo las mayores fluctuaciones se presentaron a las 23:15 Z y 23:30 desde -3°C hasta -18°C (Anexo 1.1 b y d respectivamente) y si bien es cierto que estas fluctuaciones disminuyen hacia las 23:45 Z (Anexo 1.1 f) pero con valores inferiores a -11°C.

b. Estación Carhuacayán

Para el día 8 y 9 de marzo las diferencias de temperatura de brillo en su mayoría mantienen valores por encima de los -10°C (Anexo 1.2) que son condiciones para generación de nubosidades que generan descargas eléctricas. Se observan que una buena proporción de datos también tienen valores por encima de los -5°C especialmente el día 8 de marzo (Anexo 1.2 a, c y e) que le proporcionan condiciones para mayores desarrollos verticales de nubosidades y posibilidades de ocurrencia de descargas eléctricas.

c. Estación Carhuamayo

El día 8 de marzo son pocos los valores por encima de -10°C ya que entre las 22:30 Z hasta las 23:00 Z (Anexo 1.3 a, c y e) en su mayor proporción los valores están por debajo de 10°C llegando inclusive hasta -27 °C situación que proporciona bajas probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas además de mostrar amplia fluctuación de valores muy bajos de diferencia de temperatura de brillo, sin embargo para el día 9 (Anexo 1.3 b, d y f) en gran proporción se tienen diferencias de temperatura superiores a -10°C situación que se refleja con mayores eventos nubosos de mayor desarrollo vertical y por lo tanto con mayores probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas respecto al día 8 además de mostrar menor fluctuación en los valores de diferencia de temperatura de brillo.

d. Estación Huasahuasi

Para el día 8 se tiene una gran proporción de eventos con diferencia de temperatura de brillo superior a -10°C especialmente a las 22:30 Z (Anexo 1.4 a) pero luego entre las 22:45 Z a 23:00 Z se muestran amplias fluctuaciones entre el máximo y mínimo valor llegando en algunos casos hasta -26°C . El día 9 de marzo estos valores son mayormente superiores a -10°C y las fluctuaciones respecto al día anterior son mucho menores (Anexo 1.4 b, d y f).

e. Estación Jauja

Durante el día 8 de marzo se tienen valores de diferencia de temperatura de brillo mayormente por debajo de -15°C llegando inclusive en algún momento hasta -31°C (Anexo 1.5 a, c y e) situación que proporciona pocas probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas; para el día 9 (Anexo 1.5 b, d y f) los registros son muy variados fluctuando desde -2°C hasta -18°C significando una relativa mayor cantidad de eventos convectivos respecto al día 8.

f. Estación La Oroya

Para el día 8 generalmente los valores de diferencia de temperatura de brillo están por encima de los -10°C principalmente entre las 22:45 Z y 23:00 Z (Anexo 1.6 c y e); y el día 9 es todo lo contrario llegando inclusive hasta valores de -25°C (Anexo 1.6 b, d y f) situación que le otorga bajas probabilidades para formaciones convectivas y generación de descargas eléctricas atmosféricas.

g. Estación Santa Ana

Para el día 8 de marzo los valores registrados varían entre -2°C hasta -33°C con una mayor proporción de valores inferiores a -10°C principalmente entre las 22:30 Z y 22:45 Z (Anexo 1.7 a y c) con amplias fluctuaciones entre el máximo y mínimo valor de diferencia de temperatura de brillo; para el día 9 de marzo las fluctuaciones son menores pero sin embargo los valores en su mayor proporción son inferiores a -10°C (Anexo 1.7 b, d y f).

h. Estación Tarma

El día 8 de marzo a las 22:30 Z se tienen valores de diferencia de temperatura de brillo variando entre -3°C hasta -9°C (Anexo 1.8 a) con mayores probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas; a las 22:45 Z las fluctuaciones se amplían desde -3°C hasta -24°C y para las 23:00Z estas fluctuaciones van desde -4°C hasta -30°C (Anexo 1.8 c y e) con menores posibilidades de generar descargas eléctricas atmosféricas. Para el día 9 de marzo aunque las fluctuaciones entre el valor máximo y mínimo de diferencia de temperatura de brillo disminuyen los valores en su mayoría son inferiores a -5°C (Anexo 1.8 b, d y f).

i. Estación Viques

Para el día 8 en su mayor parte los valores de diferencia de temperatura de brillo son menores a -10°C inclusive alcanzando a -35°C el cual se manifiesta entre las 22:30 Z y 22:45 Z (Anexo 1.9 a y c) mientras que a las 23:00 Z se tienen valores máximos de hasta 2°C y la dispersión de valores son mayores ya que fluctúan desde -2°C hasta -29°C (Anexo 1.9 e). Asimismo, para el día 9 si bien las fluctuaciones entre el máximo y mínimo valor de diferencia de temperatura de brillo son menores al día anterior sin embargo estos generalmente son inferiores generalmente a -10°C .

j. Estación: Yantac

Para el día 8 de marzo y entre las 22:30 Z a 23:00 Z la totalidad de los valores de diferencia de temperatura de brillo son mayores a -10°C llegando inclusive a máxima de hasta -1°C que está muy relacionado con eventos de nubosidades de gran desarrollo vertical y con ello altas probabilidades de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas (Anexo 1.10). Respecto al día 9 de marzo en general los valores son mayores a -15°C y la amplitud de las fluctuaciones entre el máximo y mínimo valor van incrementando desde las 23:15 Z hacia las 23:45 Z (Anexo 1.10) indicando que las nubosidades están sufriendo un relativo debilitamiento.

V. CONCLUSIONES

- Se georreferenciaron 189 y 911 ocurrencias de descargas eléctricas de origen atmosférico para las comunidades campesinas de Huayao y Marcapomacocha, respectivamente.
- Las diferencias de temperatura de brillo entre las bandas de vapor de agua e infrarrojo asociadas a las descargas eléctricas atmosféricas se presentaron en el umbral de -1°C hasta -27°C , siendo el rango de mayores descargas de -4 a -9°C
- A un nivel de significancia del 0.05 se determina que las variables diferencia de temperatura máxima, mínima y promedio no están asociadas a una distribución normal; asimismo, el número de descargas varía en función de los meses del año siendo esta una condición relevante para el cálculo de probabilidades del número de descargas por caso (nube) asociadas a un nivel de significancia de 0.05; las relaciones empíricas y de probabilidades encontradas en este estudio permitieron estimar la ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas en las localidades de Huayao y Marcapomacocha con altos niveles de certeza.

Siendo las relaciones de probabilidades para Marcapomacocha:

$$\begin{aligned} p2 &= \exp(-2.695378 + 45.60089 \times \text{DIF_MAX} - 10.119454 \times \text{DIF_MIN} - 35.49872 \times \text{DIF_MIN}) \\ p3 &= \exp(-4.676819 + 46.09306 \times \text{DIF_MAX} - 10.116879 \times \text{DIF_MIN} - 35.94434 \times \text{DIF_MIN}) \\ p4 &= \exp(-5.702848 + 45.34011 \times \text{DIF_MAX} - 7.661811 \times \text{DIF_MIN} - 37.74739 \times \text{DIF_MIN}) \\ p5 &= \exp(-6.179022 + 45.01235 \times \text{DIF_MAX} - 7.281029 \times \text{DIF_MIN} - 37.75950 \times \text{DIF_MIN}) \\ p6 &= \exp(-4.462684 + 51.15088 \times \text{DIF_MAX} - 20.232697 \times \text{DIF_MIN} - 31.39421 \times \text{DIF_MIN}) \\ p8 &= \exp(-68.108634 + 38.24997 \times \text{DIF_MAX} + 24.454502 \times \text{DIF_MIN} - 62.15459 \times \text{DIF_MIN}) \\ p10 &= \exp(-6.663454 + 48.78311 \times \text{DIF_MAX} - 15.341383 \times \text{DIF_MIN} - 33.57389 \times \text{DIF_MIN}) \\ p12 &= \exp(-9.209595 + 52.62275 \times \text{DIF_MAX} - 23.412237 \times \text{DIF_MIN} - 29.26101 \times \text{DIF_MIN}) \\ p1 &= 1 - (p2 + p3 + p4 + p5 + p6 + p8 + p10 + p12) \end{aligned}$$

Y para Huayao:

$$\begin{aligned}
p2 &= \exp(-2.857039 + 187.17230 \times \text{DIF_MAX} + 20.06728 \times \text{DIF_MIN} - 207.2943 \times \text{DIF_PROM}) \\
p3 &= \exp(-3.286523 + 168.36184 \times \text{DIF_MAX} + 53.72654 \times \text{DIF_MIN} - 222.1137 \times \text{DIF_PROM}) \\
p5 &= \exp(-8.773363 + 68.01485 \times \text{DIF_MAX} + 218.78063 \times \text{DIF_MIN} - 286.9024 \times \text{DIF_PROM}) \\
p6 &= \exp(-15.661054 + 263.0033 \times \text{DIF_MAX} - 141.74559 \times \text{DIF_MIN} - 121.1867 \times \text{DIF_PROM}) \\
p9 &= \exp(-106.466716 + 322.0026 \times \text{DIF_MAX} - 149.14896 \times \text{DIF_MIN} - 172.0609 \times \text{DIF_PROM}) \\
p1 &= 1 - (p2 + p3 + p5 + p6 + p9)
\end{aligned}$$

- Los diagnósticos de ocurrencia de descargas eléctricas atmosféricas fueron posible con la aplicación de la metodología de la diferencia de temperaturas de brillo de las bandas de vapor de agua e infrarrojo de los satélites meteorológicos además de la vigilancia permanente por parte del pronosticador meteorólogo con la herramienta nowcasting haciendo uso de información de estaciones y condiciones modeladas de la atmosfera.
- La implementación y puesta en práctica del SAT fue posible con la participación de la población de manera articulada con sus autoridades locales, líderes de opinión, observador meteorólogo local; así como con los operadores de las herramientas tecnológicas de vigilancia de la atmósfera que aunada a las buenas prácticas aseguraron el buen funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana que finalmente se plasma en un “formato de metadata” de verificación de implementación de Sistema de Alerta Temprana, el cual puede servir para múltiples aplicaciones.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar más investigaciones relacionadas al tema con tendencia a conocer con mejor detalle los procesos que generan las descargas eléctricas en zonas de montañas como los son los andes centrales de Perú.
- Desarrollar y mejorar las relaciones de probabilidades entre las bandas de vapor de agua e infrarrojo del satélite GOES 16 con fines de apoyar en los pronósticos de eventos extremos con las descargas eléctricas atmosféricas.
- Impulsar la implementación y desarrollo de una red de detectores de descargas eléctricas de origen atmosférico.
- Es de vital importancia el uso de radares meteorológicos en las zonas de interés para llevar a cabo el monitoreo y detección de aquellos sistemas nubosos que podrían generar tormentas eléctricas.
- Impulsar con mayor énfasis la participación de autoridades y pobladores en el desarrollo de sistemas de alerta temprana

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOULAEV, S., MARQUES, V. S., PINHEIRO, F. M. A., MARTINEZ, E. F. A., LENSKAIA, O. (2001). Analysis of mesoscale system using cloud-to-ground flash data. *Braz. J. Geophys.* 19 (1): 75–95.

ACOSTA, E. (2009). Georreferenciamiento de vulnerabilidades en línea de transmisión eléctrica de la ANDE por amenazas de canales de descargas atmosféricas. Décimo tercer encuentro nacional del CIGRE. Administración Nacional de Electricidad. Paraguay.

ACOSTA, C. M. (2013). Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla”. *Scientia et Technica.* 18(2): 303 – 308.

AKINYEMI, M. L., BOYO, A. O., EMETERE, M. E., USIKALU, M. R., OLAWOLE, F. O.(2014). *Lightning a Fundamental of Atmospheric Electricity.* ELSEVIER. 2014: 47 – 52.

ANDERSON, D. R., SWEENEY D. J. AND WILLIAMS, T. A. (2008). *Estadística para administración y economía*, 10ma Edición. Cengage Learning Editores, S.A, Santa Fe. México, D.F, 1061 pp.

AREITIO, P. J. (2010). Estudio de los rayos en el país Vasco y su relación con la precipitación. Tesis doctoral. Vitoria. Universidad del país Vasco. 245 p.

BAKER, M. B., CHRISTIAN, H. J., LATHAM, J. (1995). A computational study of the relationships linking lightning frequency and other thundercloud parameters. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 121: 1525–1548.

BYERS, H., BRAHAM, R. R. (1949). *The thunderstorm*, u.s. govt. Printing Office, Washington DC, USA, v. 287.

CÁRDENAS P. T., PABÓN C.J.D., MONTOTA G. G. (2004). Pronóstico estadístico a corto plazo de tormentas eléctricas para el Aeropuerto de Barranquilla. *Meteorología Colombiana*. 8: 79 – 87.

CHÁVEZ, S. P. J. (2008). Caracterización de Tormentas en el Valle del Mantaro mediante Sensoramiento Remoto. Tesis para Licenciamiento. Lima. Pontificia Universidad Católica del Perú. 114 p.

COORAY, V., JAYARATNE, K. P. (1994). Characteristics of lightning flashes observed in Sri Lanka in the tropics. *Journal of Geophysical Research*, 99(10): 21,051-21,056.

DEIERLING, W., PETERSEN, W. A. (2008). Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 113, n. D16.

DONALD P. W. (1979). An Application of Geostationary Satellite Rain Estimation Technique to and Extratropical Area. *Journal of Applied Meteorology*. 18: 1640-1648.

EXEQUIEL, B. R. (2008). Transferencia de carga eléctrica durante la colisión de granizos y cristales de hielo. Tesis Doctoral. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 131 p.

FALCÓN, N., QUINTERO, A. (2009). Electrometeoros y aerosoles piroeléctricos en tormentas tropicales. *Revista Ingeniería*. 16(3): 27 – 33.

GAN M. A. AND RAO V. B. (1994). The influence of the Andes Cordillera on Transient disturbances. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 1141 – 1157.

GOODMAN, S. J.; BLAKESLEE, R. J.; KOSHAK, W. J.; MACH, D.; BAILEY, J.; BUECHLER, D.; CAREY, L.; SCHULTZ, C.; BATEMAN, M.; JR, E. M. ET AL. (2013). The goes-r geostationary lightning mapper (glm). *Atmospheric Research*, v. 125, p. 34–49.

GOODMAN, S. J., CHRISTIAN, H. J., RUST, W. D. (1988). A comparison of the optical pulse characteristics of intracloud and cloud-to-ground lightning as observed above clouds. *Journal of Applied Meteorology*, v. 27, n. 12, p. 1369–1381.

HERZEGH, P. H., JAMESON, A. R. (1992). Observing precipitation through dualpolarization radar measurements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 73, n. 9, p. 1365–1376.

HOMEYER, C. R., KUMJIAN, M. R. (2015). Microphysical characteristics of overshooting convection from polarimetric radar observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 72, n. 2, p. 870–891.

HUAMÁN CH. J. (2018). Uso de multi-canais do GOES-16 para previsão imediata de densidade de descargas eléctricas. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Spaciais. San Jose dos Campos. Brasil. 165 p.

INDECI. (2018). Guía Técnica para la implementación del Sistema de Alerta Temprana Comunitario.

JOHNSON, J. C., SINGER, S. F. (1955). *Physical Meteorology*. *Physics Today* 8 (1): 313 – 316.

KEITH, W., SAUNDERS, C. (1990). Further laboratory studies of the charging of graupel during ice crystal interactions. *Atmospheric Research*, v. 25, n. 5, p. 445–464.

KUMJIAN, M. R., KHAIN, A. P., BENMOSHE, N., ILOTOVIZ, E., RYZHKOV, A. V., PHILLIPS, V. T. (2014). The anatomy and physics of z dr columns: investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 53, n. 7, p. 1820–1843.

LANG, T. J., RUTLEDGE, S. A. (2002). Relationships between convective storm kinematics, precipitation, and lightning. *Monthly Weather Review*, v. 130, n. 10, p. 2492–2506.

LIMA, K., GOMES, R. (2009). Detecção de Descargas Elétricas Atmosféricas em Sistemas Convectivos com Dados do SIMEPAR. *Revista Brasileira de Geofísica*. 27(1): 5 – 16.

LOPEZ, R. A. (2006). Sistema de alerta temprana por inundaciones, experiencia en El Salvador. *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006)*, IAHS Publ. 308.

MAC GORMAN, D. R. AND RUST, W. D. (1998). *The Electrical Nature of Storms*, Oxford University Press, New York, 422 pp.

MACHADO, L., LIMA, W., PINTO O. JR., MORALES, C. (2009). Relationship between cloud-ground Lightning and Penetrative Clouds: A Multi-channel Satellite Application. *ELSEVIER 93*: 304 - 309.

MACHADO, L., VILA, D., LAURENT, H., MORALES, C., CEBALLOS, J., MIRANCOS, F., NOSAKI, S. (2003). Sistema de Previsão Imediata de Ocorrência de Tempestades para Apoio a Tomada de Decisão na Distribuição e Manutenção da Rede Elétrica. Trabalho Submetido ao CITENEL

MATTOS, E. V.; MACHADO, L. A. (2011). Cloud-to-ground lightning and mesoscale convective systems. *Atmospheric Research*, v. 99, n. 3, p. 377–390.

MATTOS, E. V., MACHADO, L. A., WILLIAMS, E. R., GOODMAN, S. J., BLAKESLEE, R. J., BAILEY, J. C. (2017). Electrification life cycle of incipient thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 122, n. 8, p. 4670–4697.

MECIKALSKI, J. R.; BEDKA, K. M. (2006). Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime goes imagery. *Monthly Weather Review*, v. 134, n. 1, p. 49–78.

MECIKALSKI, J. R., BEDKA, K. M., PAECH, S. J., LITTEN, L. A. (2008). A statistical evaluation of goes cloud-top properties for nowcasting convective initiation. *Monthly Weather Review*, v. 136, n. 12, p. 4899–4914.

MECIKALSKI, J. R.; JR, W. M. M.; KOENING, M.; MULLER, S. (2010). Cloud-top properties of growing cumulus prior to convective initiation as measured by meteosat second

generation. part i: infrared fields. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 49, n. 3, p. 521–534.

MECIKALSKI, J. R.; LI, X.; CAREY, L. D.; JR, E. W. M.; COLEMAN, T. A. (2013). Regional comparison of goes cloud-top properties and radar characteristics in advance of first-flash lightning initiation. *Monthly Weather Review*, v. 141, n. 1, p. 55–74.

NIETZSCH, D. R. (2006). Nova Metodologia para Identificação de Pontos Críticos de Desempenho em linhas de Transmissão Baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas. Tesis doctoral. Bello Horizonte. Brasil. Universidad Federal de Minas Gerais. Bello Horizonte. 268 p.

NOAA/NASA. Advanced Baseline Imager (ABI). Disponível em: <<http://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html>>. Acesso em: 15 feb.2019.

OLARTE, A. E. (2012). Sistema de información y monitoreo de tormentas eléctricas en Colombia. Tesis de Magister. Bogotá. Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 122 p.

PETERSEN, W. A.; RUTLEDGE, S. A. (1998). On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 103, n. D12, p. 14025–14040, 16

PINTO, JR. O., I.R.C.A. PINTO, NACCARATO, K.P. (2007). Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review. *ELSEVIER* 87: 189 – 200.

RAKOV, V.A. (2013). The physics of lightning. *Surv Geophys* 34:701–729.

RACHIDI, F. AND RUBINSTEIN, M. (2009). 4th International COST Symposium on Lightning Physics and Effects, Vienna.

SCAVUZZO, C. M., AVILA, E. E., CARANTI, G. M. (1994). Estudio numérico de la electrificación de nubes. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 10(3): 173 – 185.

SCHMETZ, J., TJEMKES, S. A., VAN DE BERG, L. (1997). Warm water vapour pixels over high clouds as observed by METEOSAT. *Contributions to Atmospheric Physics* 70(1):15-21

SCHMIT, T. J., GUNSHOR, M. M., MENZEL, W. P., GURKA, J. J., LI, J., BACHMEIER, A. S. (2005). Introducing the next-generation advanced baseline imager on goes-r. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 86, n. 8, p. 1079–1096.

SNYDER, J. C., RYZHKOV, A. V., KUMJIAN, M. R., KHAIN, A. P., PICCA, J. (2015). Az dr column detection algorithm to examine convective storm updrafts. *Weather and Forecasting*, v. 30, n. 6, p. 1819–1844.

TESSENDORF, S. A., MILLER, L. J., WIENS, K. C., RUTLEDGE, S. A. (2005). The 29 june 2000 supercell observed during steps. part i: kinematics and microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 62, n. 12, p. 4127–4150.

UMAN, M. A. (1987). *The Lightning Discharge*. International Geophysics Series 39: 97 - 107

VILA, D.A., MACHADO, L.A.T., LAURENT, H., VELASCO, I., (2008). Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation 23: 344 – 365. [https://doi.org/ 10.1175/2007WAF2006121.1](https://doi.org/10.1175/2007WAF2006121.1).

WALLACE, J. M., HOBBS, P. V. (2006). *Atmospheric Science an Introductory Survey*. 2. ed. University Washington. 92.

WILLIAMS, E. R. (1989). The Tripole Structure of Thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*. 92 (2): 13151-13167.

WORKMAN, E., REYNOLDS, S. (1949). Electrical activity as related to thunderstorm cell growth. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 30, n. 4, p. 142–144.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Evolución de la diferencia de temperatura de brillo (TB9-TB14) en estaciones de cuenca del Río Mantaro durante simulaciones

Anexo 1.1. Estación Yauli

Anexo 1.2. Estación Carhuacayán

Anexo 1.3. Estación Carhuamayo

Anexo 1.4. Estación Huasahuasi

Anexo 1.5. Estación Jauja

Anexo 1.6. Estación La Oroya

Anexo 1.7. Estación Santa Ana

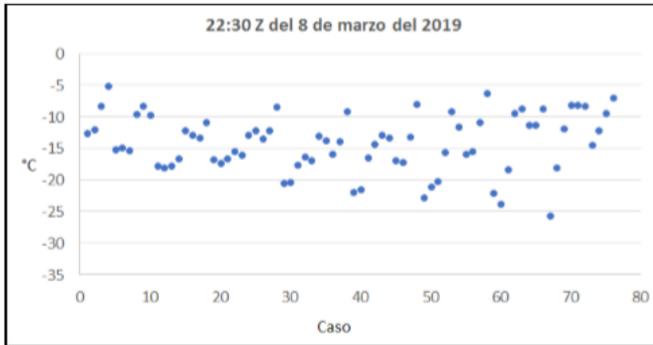
Anexo 1.8. Estación Tarma

Anexo 1.9. Estación Viques

Anexo 1.10. Estación Yantac

Anexo 1.1. Estación Yauli

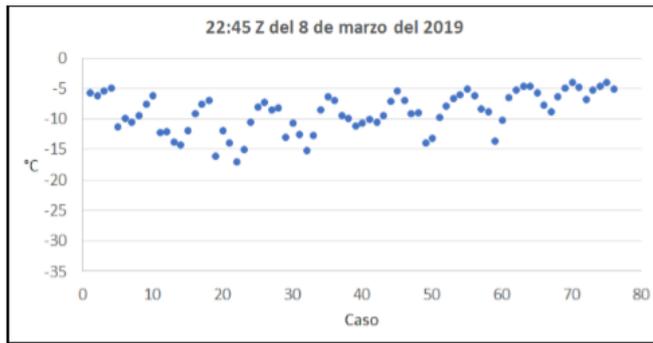
a



b



c



d



e

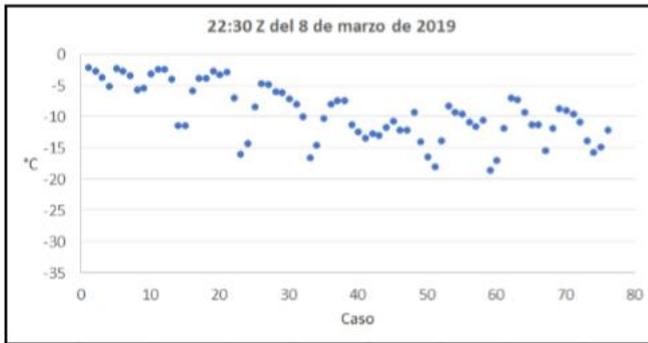


f



Anexo 1.2. Estación Carhuacayán

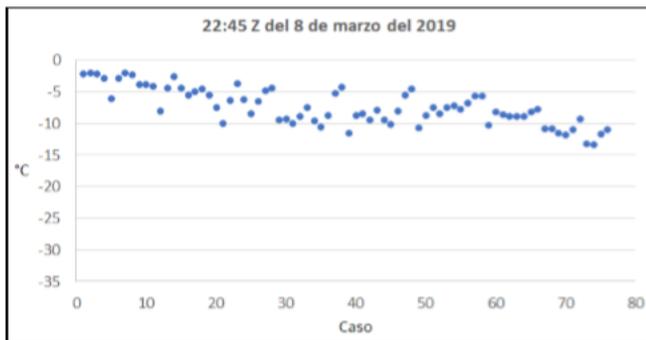
a



b



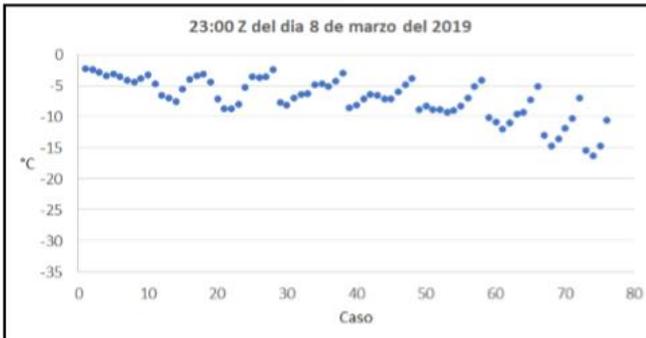
c



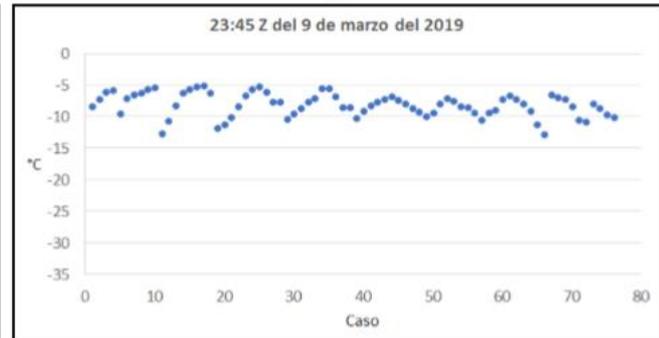
d



e

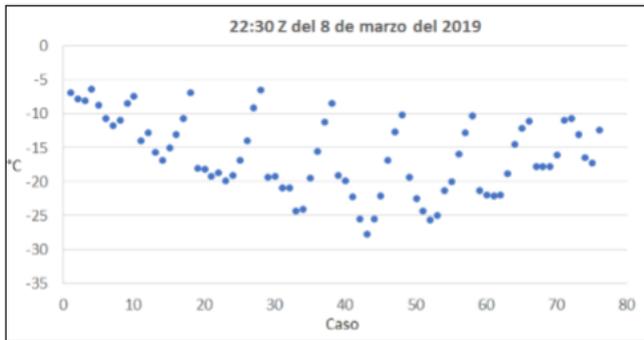


f



Anexo 1.3. Estación Carhuamayo

a



b



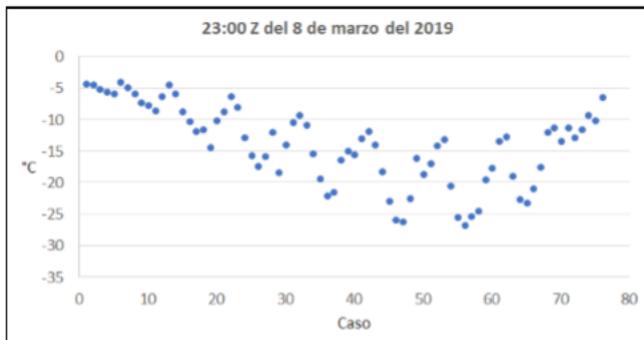
c



d



e



f



Anexo 1.4. Estación Huasahuasi

a



b



c



d



e



f

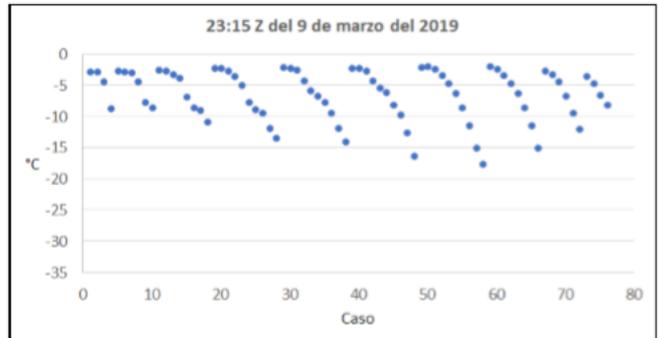


Anexo 1.5. Estación Jauja

a



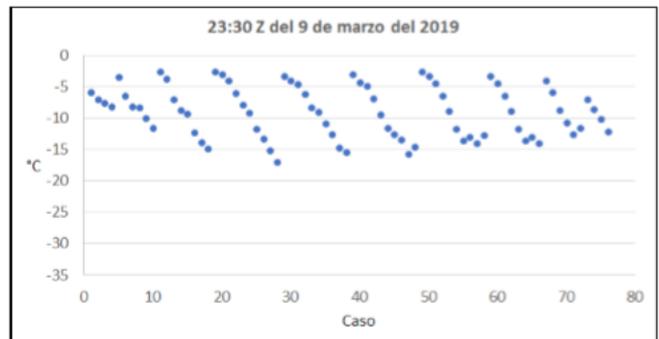
b



c



d



e



f



Anexo 1.6. Estación La Oroya

a



b



c



d



e

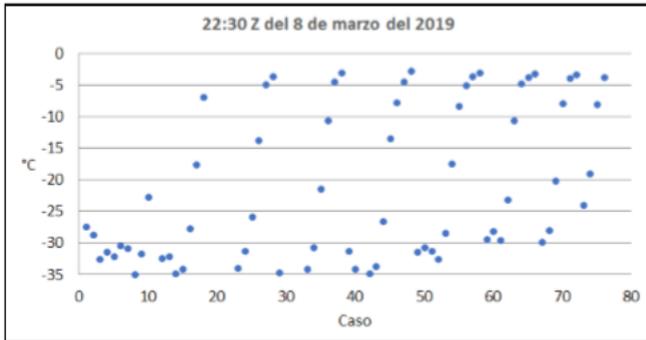


f



Anexo 1.7. Estación Santa Ana

a



b



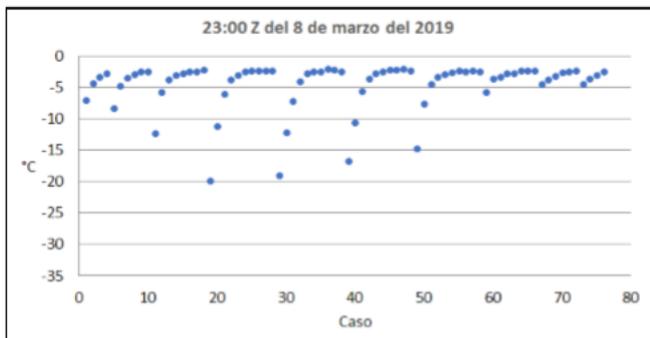
c



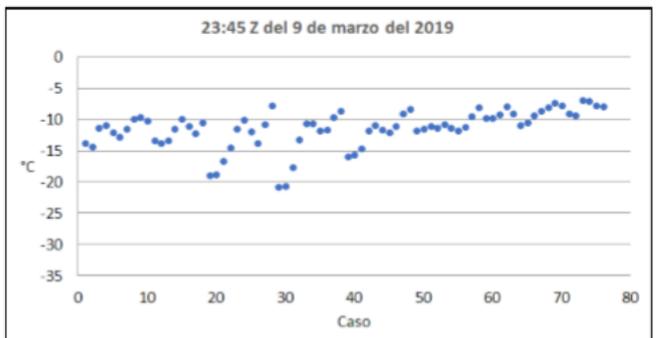
d



e



f



Anexo 1.8. Estación Tarma

a



b



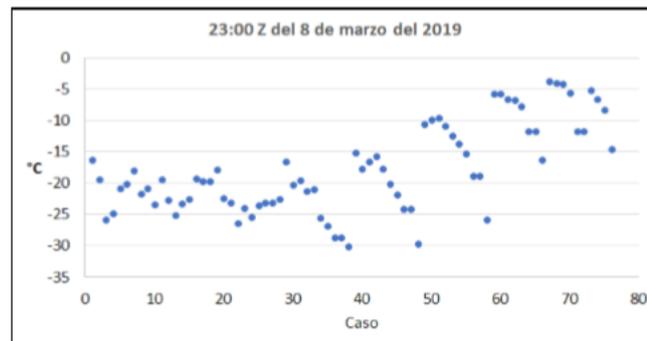
c



d



e

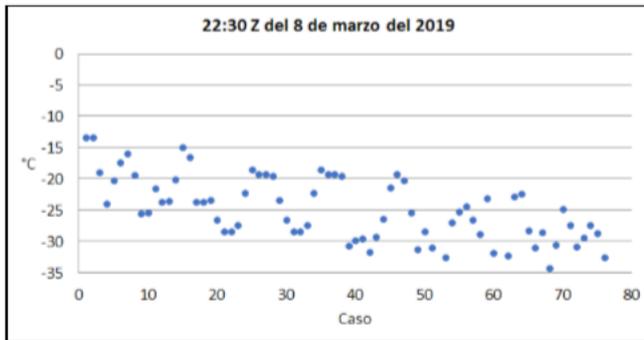


f



Anexo 1.9. Estación Viques

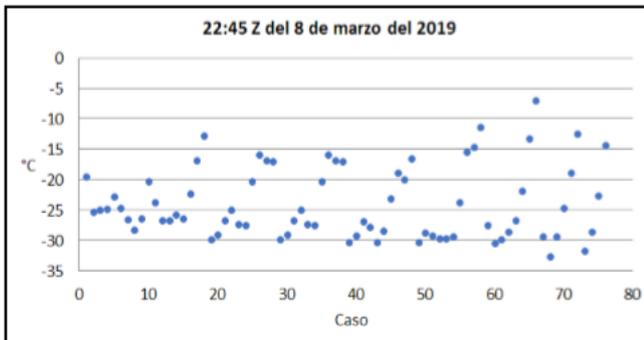
a



b



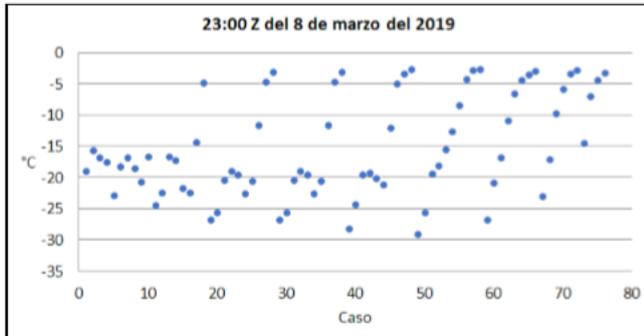
c



d



e

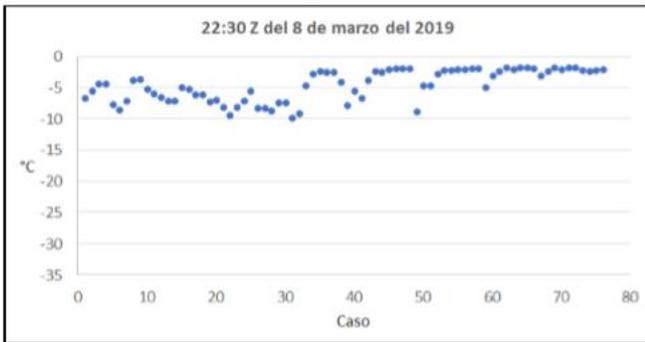


f

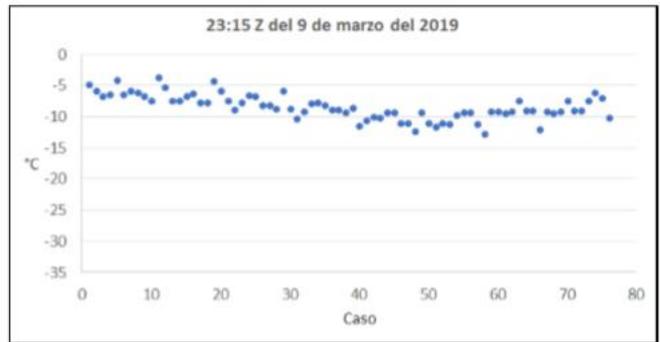


Anexo 1.10. Estación Yantac

a



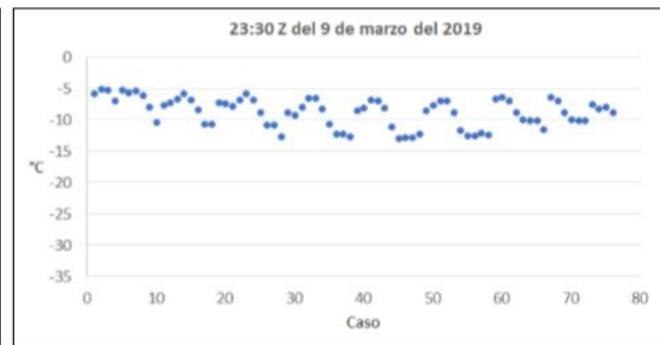
b



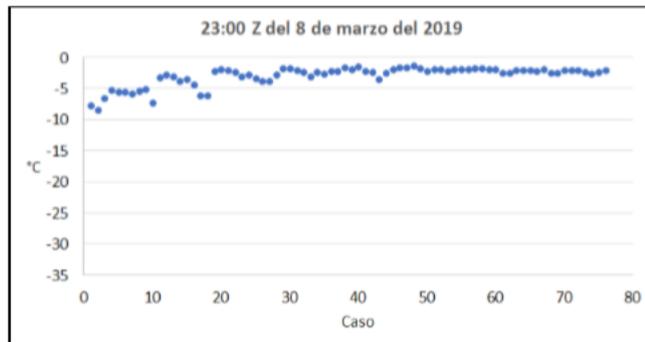
c



d



e



f



Anexo 2. Scripts para extracción de temperatura de brillo en las bandas 3 y 4 respectivamente del GOES 13.

```
pr: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
'reinit'
'sdfopen IR3_201709.nc'
'set lat -11.21441'
'set lon -76.4057'
'c'
'set t 1 1440'
'set gxout print'
**formato numerico de salida
'set prnopts %6.2f 1 1'
k=1while(k<=1441)
'd IR3'
dd=sublin(result,k)
hh=subwrdd(dd,1)
write('TBR_IR3_201709_101.txt',hh,append)
k=k+1
endwhile
```

```
pr: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
'reinit'
'sdfopen IR4_201709.nc'
'set lat -11.21441'
'set lon -76.4057'
'c'
'set t 1 1440'
'set gxout print'
**formato numerico de salida
'set prnopts %6.2f 1 1'
k=1while(k<=1441)
'd IR4'
dd=sublin(result,k)
hh=subwrdd(dd,1)
write('TBR_IR4_201709_101.txt',hh,append)
k=k+1
endwhile
```

Anexo 3. Código fuente en R utilizado para cálculo de probabilidades de descargas eléctricas atmosféricas

```
#Instalar paquetes antes de hacer cualquier cosa
library(pracma)
library(tidyr)
library(lubridate)
library(ggplot2)
library(reshape2)
library(geosphere)
library(tseries)
library(foreign)
library(forecast)
library(nnet)
library(scales)

#Configurar directorio de trabajo
setwd("D:/CST/Weidy")      #Cambiar ruta de directorio de trabajo

#Funcion 1
 analisis<-function(datos,limites){  colnames(datos)<
 c("AÑO","MES","DIA","HORA","MINUTO","LATITUD","LONGITUD","IR3","IR4","
 DIF")
 # Valores ilógicos
 datos<-datos[!datos$DIF>0,]
 datos$DIF<-abs(datos$DIF)
 # Limpiar nans
 datos<-datos[!is.na(datos$IR3),]
 datos<-datos[!is.na(datos$IR4),]
 datos<-datos[!is.na(datos$LONGITUD),]
 datos<-datos[!is.na(datos$LATITUD),]
 # Outliers
 datos<-datos[!datos$DIF>30,]
 #Ordenando con varios criterios
```

```

datos<-datos[order(datos$MINUTO),]
datos<-datos[order(datos$HORA),]
datos<-datos[order(datos$DIA),]
datos<-datos[order(datos$MES),]
datos<-datos[order(datos$AÑO),]
#Creando variable fecha
datos<-cbind(unite(datos[,c(1,2,3,4,5)],TIEMPO),datos)
datos$TIEMPO<-ymd_hm(datos$TIEMPO)
#Creando variable distancia
lat<-which(colnames(datos)== "LATITUD")
long<-which(colnames(datos)== "LONGITUD")
datos$DISTANCIA<-0
for(i in 2:nrow(datos)){
datos$DISTANCIA[i]<-distm(datos[i,c(long,lat)],datos[(i-1),c(long,lat)], fun =
distHaversine)
}
datos<-data.frame(DISTANCIA=datos$DISTANCIA,datos[,
which(colnames(datos)== "DISTANCIA")])
#Centro y radio
radio<-limites[4]
centro<-c(median(datos$LONGITUD),median(datos$LATITUD))
lat<-which(colnames(datos)== "LATITUD")
long<-which(colnames(datos)== "LONGITUD")
ii<-c()
for(i in 1:nrow(datos)){
ii[i]<-distm(datos[i,c(long,lat)],centro, fun = distHaversine)<=radio
}
datos<-datos[ii,]
#Creando variable casos
dist<-which(colnames(datos)== "DISTANCIA")
tiempo<-which(colnames(datos)== "TIEMPO")
dif<-which(colnames(datos)== "DIF")
ltiempo<-limites[1]
ldist<-limites[2]

```

```

ldif<-limites[3]
datos$CASO<-NA
datos$CASO[1]<-1
for(i in 2:nrow(datos)){
if(abs(difftime(datos[i,tiempo],datos[i-1,tiempo]))<minutes(ltiempo)){
if(abs(datos[i,dist]-datos[i-1,dist])<ldist){
if(abs(datos[i,dif]-datos[i-1,dif])<ldif){
datos$CASO[i]<-datos$CASO[i-1]
}
else{ datos$CASO[i]<-datos$CASO[i-1]+1 }
}
else{ datos$CASO[i]<-datos$CASO[i-1]+1 }
}
else{ datos$CASO[i]<-datos$CASO[i-1]+1 }
}
}
datos1<-data.frame(CASO=datos$CASO,datos[,-which(colnames(datos)=="CASO")])
descargas<-rle(datos1$CASO)$length
caso<-rle(datos1$CASO)$values
difmin<-abs(tapply(datos1$DIF,datos1$CASO,min))
difmax<-abs(tapply(datos1$DIF,datos1$CASO,max))
difavg<-abs(tapply(datos1$DIF,datos1$CASO,mean))
difmed<-abs(tapply(datos1$DIF,datos1$CASO,median))
fecmed<-tapply(datos1$TIEMPO,datos1$CASO,median)
fecmed<-as.POSIXct(fecmed,origin="1970-01-01", tz = "UTC",locale =
Sys.getlocale("LC_TIME"),truncated=0)
datos2<
data.frame(CASO=caso,FECHA=fecmed,DIF_MIN=difmin,DIF_MAX=difmax,DIF_AV
G=difavg,DIF_MED=difmed,DESCARGAS=descargas)
datos2_1<-datos2
#AGRUPANDO POR HORA
datos2_1$ID_HORA<factor(paste(year(datos2_1$FECHA),month(datos2_1$FECHA),day
(datos2_1$FECHA),h
our(datos2_1$FECHA),sep="-"))
descargas_hor_min<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd_h(datos2_1$ID_HOR

```

```

A),min))
descargas_hor_max<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd_h(datos2_1$ID_HOR
A),max))
descargas_hor_avg<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd_h(datos2_1$ID_HOR
A),mean))
descargas_hor_med<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd_h(datos2_1$ID_HOR
A),median))
descargas_hor_sum<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd_h(datos2_1$ID_HOR
A),sum))
dif_min_hor<-
as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MIN,ymd_h(datos2_1$ID_HORA),mean))
dif_max_hor<as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MAX,ymd_h(datos2_1$ID_HORA),mean))
dif_avg_hor<as.vector(tapply(datos2_1$DIF_AVG,ymd_h(datos2_1$ID_HORA),mean))
dif_med_hor<as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MED,ymd_h(datos2_1$ID_HORA),mean))
datos3<data.frame(HORA=ymd_h(unique(datos2_1$ID_HORA)),DIF_MIN=dif_min_hor,
DIF_M
AX=dif_max_hor,DIF_AVG=dif_avg_hor,DIF_MED=dif_med_hor,
DESCARGAS_MIN=descargas_hor_min,DESCARGAS_MAX=descargas_hor_max,DES
CARGAS_AVG=descargas_hor_avg,DESCARGAS_MED=descargas_hor_med,DESCAR
GAS_SUM=descargas_hor_sum)
#AGRUPANDO POR DIA
datos2_1$ID_DIA<factor(paste(year(datos2_1$FECHA),month(datos2_1$FECHA),day(d
atos2_1$FECHA),se
p="-"))
descargas_dia_min<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_DIA),mi
n))
descargas_dia_max<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_DIA),m
ax))
descargas_dia_avg<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_DIA),me
an))
descargas_dia_med<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_DIA),m
edian))
descargas_dia_sum<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_DIA),su
m))
dif_min_dia<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MIN,ymd(datos2_1$ID_DIA),mean))
dif_max_dia<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MAX,ymd(datos2_1$ID_DIA),mean))

```

```

dif_avg_dia<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_AVG,ymd(datos2_1$ID_DIA),mean))
dif_med_dia<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MED,ymd(datos2_1$ID_DIA),mean))
datos4<data.frame(DIA=ymd(unique(datos2_1$ID_DIA)),DIF_MIN=dif_min_dia,DIF_MAX=dif_max_dia,DIF_AVG=dif_avg_dia,DIF_MED=dif_med_dia,DESCARGAS_MIN=descargas_dia_min,DESCARGAS_MAX=descargas_dia_max,DESCARGAS_AVG=descargas_dia_avg,DESCARGAS_MED=descargas_dia_med,DESCARGAS_SUM=descargas_dia_sum)

#AGRUPANDO POR MES
datos2_1$ID_MES<factor(paste(year(datos2_1$FECHA),month(datos2_1$FECHA),"01",sep="-"))
descargas_mes_min<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_MES),min))
descargas_mes_max<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_MES),max))
descargas_mes_avg<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_MES),mean))
descargas_mes_med<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_MES),median))
descargas_mes_sum<as.vector(tapply(datos2_1$DESCARGAS,ymd(datos2_1$ID_MES),sum))
dif_min_mes<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MIN,ymd(datos2_1$ID_MES),mean))
dif_max_mes<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MAX,ymd(datos2_1$ID_MES),mean))
dif_avg_mes<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_AVG,ymd(datos2_1$ID_MES),mean))
dif_med_mes<-as.vector(tapply(datos2_1$DIF_MED,ymd(datos2_1$ID_MES),mean))
datos5<data.frame(MES=ymd(unique(datos2_1$ID_MES)),DIF_MIN=dif_min_mes,DIF_MAX=dif_max_mes,DIF_AVG=dif_avg_mes,DIF_MED=dif_med_mes,DESCARGAS_MIN=descargas_mes_min,DESCARGAS_MAX=descargas_mes_max,DESCARGAS_AVG=descargas_mes_avg,DESCARGAS_MED=descargas_mes_med,DESCARGAS_SUM=descargas_mes_sum)

datos5$MES<-format(datos5$MES, "% Y-%m")
resultado<-list(datos1,datos2,datos3,datos4,datos5)

```

```

names(resultado)<-c("datos1","datos2","datos3","datos4","datos5")
return(resultado)
}
#Función 2
prob<-function(datos,ndes,mes,dif,ldif){
if(missing(ldif)){ldif=3.5}
trans<-function(x,ldif){floor(x/ldif)+1}
dif_avg2<-c()
for(i in 1:length(datos$DIF_AVG)){
dif_avg2[i]<-trans(x=datos$DIF_AVG[i],ldif)
}
datos<-data.frame(datos,DIF_AVG_GRUPO=dif_avg2)
datos$MES<-month(datos$FECHA)
cat<-trans(dif,ldif)
n<-nrow(datos)
##Prob cond mes
prob_mes<nrow(subset(datos,DESCARGAS==ndes&MES==mes))*100/nrow(subset(dato
s,MES==m es))
##Prob cond dif
prob_dif<nrow(subset(datos,DESCARGAS==ndes&DIF_AVG_GRUPO==cat))*100/nro
w(subset(d atos,DIF_AVG_GRUPO==cat))
##Prob cond dif mes
prob_mes_dif<
nrow(subset(datos,DESCARGAS==ndes&DIF_AVG_GRUPO==cat&MES==mes))*100/
nrow(subset(datos,DIF_AVG_GRUPO==cat&MES==mes))
resultado<
list(PROB_COND_DIF=prob_dif,PROB_COND_MES=prob_mes,PROB_COND_DIF_M
ES=prob_mes_dif)
return(resultado) }
#Aplicando funciones y generando las datas
datos<-read.csv("HUAYAO_BRILLO_GOES_2015_2016_2017.csv")
#Cambiar nombre del archivo

```

```

limit<-c(ltiempo=20,ldist=10000,ldif=3.5,radio=10000)
#Donde:
#ltiempo:tiempo de vida de nube
#ldist: distancia maxima de rayos entre una misma nube
#ldif: diferencia maxima entre descargas de una misma nube
#radio: radio del area de analisis
resultado<- analisis(datos,limites=limit)
#Almacena las datas generadas
datos1<-resultado[["datos1"]]
datos2<-resultado[["datos2"]]
datos3<-resultado[["datos3"]]
datos4<-resultado[["datos4"]]
datos5<-resultado[["datos5"]]
#COORDENADAS
coordenadas1<-ggplot(datos1,aes(x=LONGITUD,y=LATITUD))+
stat_density2d(aes(color=..level..))+geom_point(size=1,col="#D83015")+
ggtitle("COORDENADAS DE LAS DESCARGAS ELECTRICAS")
print(coordenadas1)
#Probabilidades de descargas
rng<-sort(unique(datos2$DESCARGAS))
crd<-length(rng)
for(j in 1:crd){
prob_ndes<-c()
for(i in 1:12){
prob_ndes[i]<-prob(datos2,ndes=j,mes=i,dif=3.2)$PROB_COND_MES
}
mes<-c("Enero","Febrero","Marzo","Abril","Mayo","Junio","Julio",
"Agosto","Septiembre","Octubre","Noviembre","Diciembre")
PROB_NDES<-data.frame(MES=1:12,PROBABILIDAD=prob_ndes)
graf<-ggplot(PROB_NDES, aes(x=MES, y=PROBABILIDAD)) + geom_line()+
scale_x_continuous(labels=mes,breaks=seq(1:12))+
geom_text(label=paste(as.character(round(PROB_NDES[,2],3)),"%")+
ggtitle(paste("PROBABILIDAD DE NUMERO DE DESCARGAS =",rng[j]))
print(graf)

```

```
}  
#Aplica la funcion prob  
#Donde: #ndes:Numero de descargas #mes: mes  
#dif: diferencia de IR  
#prob(datos2,ndes=1,mes=1,dif=3.2)  
#Guarda las datas generadas en el directorio  
write.csv(datos1,"datos1.csv")  
write.csv(datos2,"datos2.csv")  
write.csv(datos3,"datos3.csv")  
write.csv(datos4,"datos4.csv")  
write.csv(datos5,"datos5.csv")
```

Anexo 4. Acta de conformación de comité de Sistema de Alerta temprana por descargas eléctricas atmosférica en comunidad campesina de Marcapomacocha

ACTA DE CONFORMACION DEL COMITE DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS
MARCAPOMACOCHA - PERU

Siendo las 15:00 del día 20 de Setiembre del 2018, reunidos en.....
Local Comunal de la Comunidad habiendo sostenido una
reunión.....su relación a la conformación del SAT se acuerda
conformar el Comité de Sistema de Alerta Temprana por Descargas Eléctricas Atmosféricas para la
Comunidad Campesina de Marcapomacocha, la cual está conformada por:

Receptora inicial de Información Hidrometeorológica: Julia Astudillo

Presidente: Elizabeth Cerrón Zeballos

Miembros: Godofredo Keniz Capcha
Julia Contreras Astudillo

Brigadistas: Ramiro Jacay Hidalgo
Christian Astudillo Capcha
Edith Gómez Aguilar

Cuyas funciones serán establecidas por acuerdo.

Siendo las 15:00 horas del día 20 de Setiembre del 2018.

Firman los miembros del Comité

[Firma]
[Firma] Julia Contreras A.

[Firma]
Godofredo Vaz c.

[Firma]
Edith Gomez A

[Firma]
Christian Astudillo Capcha

[Firma]
Wendi Blans Urbaveca
Tesista

Anexo 5. Acta de conformación de comité de Sistema de Alerta temprana por descargas eléctricas atmosférica en comunidad campesina de Huayao

ACTA DE CONFORMACION DEL COMITE DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR DESCARGAS ELECTRICAS ATMOSFERICAS

HUAYAO - PERU

Siendo las 14:00 del día 21 de Setiembre del 2019, reunidos en.....
Local Comunal de Huayao y habiendo sostenido una
reunión relativa a la implementación S.A.T. Rayos se acuerda
conformar el Comité de Sistema de Alerta Temprana por Descargas Eléctricas Atmosféricas para la
Comunidad Campesina de Marcapomacocha, la cual está conformada por:

Receptora inicial de Información Hidrometeorológica: Marcelina
Melgar

Presidente: Luis Antezano Vilchez

Miembros: Alvaro de la Cruz Casas

Brigadistas: Lidia Jimenez Cuervo

Cuyas funciones serán establecidas por acuerdo.

Siendo las 16:00 horas del día 21 de Setiembre del 2019

Firman los miembros del Comité

Alvaro de la Cruz C. Lidia Jimenez Cuervo Marcelina Melgar

Luis Antezano Vilchez

Anexo 6. Talleres participativos en comunidad campesina de Marcapomacocha







Anexo 7. Talleres participativos en comunidad campesina de Huayao





Anexo 8. Formato de verificación de implementación de Sistema de Alerta Temprana por descargas eléctricas atmosféricas en comunidad campesina de Marcapomacocha




FORMATO DE VERIFICACION

IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

Localidad: c.p. Marcapomacocha Distrito: Marcapomacocha Provincia: Yauli
 Región: Junín Fecha: 08-07-19 Responsable: Weirdi Flores Villanueva

Hora de Inicio del Evento: 14:30 Hora de Término del Evento:
 Persona de SENAMHI que comunica el evento: Bremilda Sutizal

¿Se alertó la ocurrencia de eventos de descargas eléctricas atmosféricas? Llegaron a ocurrir?

Sí ocurrieron No ocurrieron

¿Ocurrieron eventos peligrosos de descargas eléctricas atmosféricas pero SENAMHI no avisó?:

Sí avisó No avisó

Persona en la comunidad al que se le comunicó del evento: Julia Astudillo
Capitana Cargo: Observadora Meteorológica

Como cataloga la ocurrencia del evento (Marque con un aspa): (será llenado por el observador)

Débil Moderado Fuerte

Las siguientes, serán completadas por algún miembro de la comunidad (presidentes, brigadistas, etc)

Se tiene algún o algunos reportes de daños ocasionados: Sí No

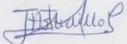
Si la respuesta es sí, describa que tipo de daños fueron:

Ceremonia de celebración día de la mujer

Si hubieron eventos peligrosos que se confirmaron con el aviso del SENAMHI, se pudo activar a tiempo el SAT: Sí No

Persona que activó el dispositivo sonoro para dar aviso a la población:

Lourdes Zeballos Zarate Bre AS

 Bremilda Sutizal

Weiridi Flores V. Tesista Julia Astudillo C. Lourdes Zeballos Z

Anexo 9. Formato de verificación de implementación de Sistema de Alerta Temprana por descargas eléctricas atmosféricas en comunidad campesina de Huayao

USAID CIIFEN

FORMATO DE VERIFICACION

IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

Localidad: Huayao Distrito: Huachac Provincia: _____
 Región: Tarma Fecha: 09-07-19 Responsable: Weidi Flores V.

Hora de Inicio del Evento: 16:35 Hora de Término del Evento: 17:00
 Persona de SENAMHI que comunica el evento: Benito Valdemama

¿Se alertó la ocurrencia de eventos de descargas eléctricas atmosféricas? Llegaron a ocurrir?
 Sí ocurrieron No ocurrieron

¿Ocurrieron eventos peligrosos de descargas eléctricas atmosféricas pero SENAMHI no avisó?:
 Sí avisó No avisó

Persona en la comunidad al que se le comunicó del evento: Marcelina Melgar
 Cargo: Observadora Meteoróloga

Como cataloga la ocurrencia del evento (Marque con un aspa): (será llenado por el observador)
 Débil Moderado Fuerte

Las siguientes, serán completadas por algún miembro de la comunidad (presidentes, brigadistas, etc)
 Se tiene algún o algunos reportes de daños ocasionados: Si No

Si la respuesta es sí, describa que tipo de daños fueron: _____
Durante el evento las personas en campo optaron por protegerse siguiendo recomendaciones.

Si hubieron eventos peligrosos que se confirmaron con el aviso del SENAMHI, se pudo activar a tiempo el SAT: Si No

Persona que activó el dispositivo sonoro para dar aviso a la población: Lidia Jimenez Cueva (pobladora)

Weidi Flores V. Marcelina Melgar Lidia Jimenez Benito Valdemama
 Tesista SENAMHI

Anexo 10. Simulaciones de SAT en comunidad campesina de Marcapomacocha (08-032019)



Anexo 11. Simulaciones de SAT en comunidad campesina de Huayao (09 – 03 – 2019)

